

691.3(075.8)

Д24

ДВОРКІН Л.Й.

БЕТОНИ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ



 **КОНДОР**

691.3(075.8)
Д24

Л.Й.Дворкін

Бетони спеціального призначення

Навчальний посібник

КНИГОСЛОВИЩЕ

**КОНДОР**
Київ, 2018

32/30 (75,8)

УДК 666.031

Д24

Рекомендовано вченою радою Національного університету
водного господарства та природокористування.

(Протокол № 8 від 13 жовтня 2017 р.)

Рецензенти:

Толмачов С.М., д-р техн. наук, професор Харківського національного автомобільно-дорожнього інституту
Хлапук М.М., д-р техн. наук, професор, Національний університет водного господарства та природокористування (м. Рівне).

Дворкін Л.Й.

Д24 Бетони спеціального призначення: Навчальний посібник / Дворкін Л.Й. – К.: Видавничий дім «Кондор», 2018. – 354 с.

ISBN 978-617-7582-30-3

482555

У навчальному посібнику викладено основи технології, властивості і напрямки застосування групи спеціальних бетонів, що використовуються в будівництві. Розглянуто основні особливості, шляхи досягнення і регулювання властивостей спеціальних бетонів, способи підвищення їх довговічності та ефективності в будівельних конструкціях і виробах. Наведено діючі нормативні дані, що регламентують технічні вимоги до спеціальних бетонів.

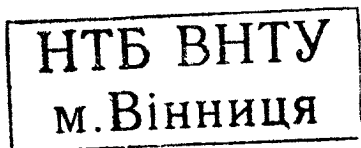
Посібник призначено для студентів будівельних спеціальностей вищих навчальних закладів. Він також корисний для інженерно-технічних працівників будівельних організацій та підприємств.

ISBN 978-617-7582-30-3

УДК 666.031

© Дворкін Л.Й., 2018

© Видавничий дім «Кондор», 2018



ПЕРЕДМОВА



Досвід, накопичений різними галузями будівництва, переконливо показує, що бетон є універсальним будівельним матеріалом. Конкретні особливості експлуатації конструкцій і споруд зумовлюють специфічні вимоги до бетону та відповідно особливості його технології.

Однією з визначальних класифікаційних ознак для бетонів є основне призначення, що визначає галузь їх застосування. Разом із загальнобудівельними або конструкційними бетонами, призначеними для виробів і конструкцій найбільш масового застосування, широко застосовують спеціальні бетони для певних галузей будівництва і конкретних видів бетонних робіт. Номенклатура спеціальних бетонів є досить широкою і в міру розвитку будівництва включає все нові різновиди.

У навчальному посібнику автор спробував висвітлити найбільш важливі особливості, що стосуються специфічних властивостей і складів групи спеціальних бетонів, які включають гідротехнічні, дорожні, теплоізоляційні, декоративні, жаростійкі, хімічно стійкі, напружувальні, електротехнічні та радіаційно-захисні бетони. Розглянуто також високоміцні бетони та фібробетони, які також можна розглядати як бетони спеціального призначення.

У книзі використано результати багаторічних наукових досліджень автора у Національному університеті водного господарства та природокористування.

Автор усвідомлює, що посібник можна було б істотно доповнити та поглибити, також буде вдячний читачам за пропозиції.

Автор вдячний рецензентам посібника, зауваження яких враховано при його підготовці.

Автор також вдячний інженерам Л.І.Ніхаєвій та Л.А.Мацько за технічну допомогу при підготовці посібника до видання.

1. ВСТУП. КЛАСИФІКАЦІЯ БЕТОНІВ

У XXI ст бетон увійшов як основний будівельний матеріал, який значною мірою визначає рівень сучасної цивілізації. Світовий обсяг застосування бетону перевищив 2 млрд.м³. Переваги бетону – необмежена сировинна база і порівняно низька вартість, екологічність, можливість застосування в різних експлуатаційних умовах і досягнення високої архітектурно-будівельної виразності, доступність технології та можливість забезпечення високого рівня механізації і автоматизації технологічних процесів – обумовлюють привабливість цього матеріалу і його провідні позиції. Досягнення бетонознавства і технології бетону дозволяють проектувати бетон, виробити і конструкції з необхідними властивостями, прогнозувати і управляти його властивостями. Бетон відноситься до числа найбільш універсальних матеріалів, який можливо використовувати у різноманітних галузях будівництва.

Номенклатура бетонів, що використовуються, в сучасному будівництві надзвичайно широка і постійно розширюється. Цьому значною мірою сприяє науково-технічний прогрес в технології в'язучих матеріалів, заповнювачів і різноманітних добавок до бетону

В даний час немає єдиної загальноприйнятої класифікації бетонів. Можна назвати велику кількість класифікаційних ознак для бетонів, основні з яких наведені в табл.1.1.

По кожному з класифікаційних ознак можлива як одноступенева, так і багатоступенева класифікація(табл.1.2). Наприклад, по виду в'язучого розрізняють цементні, силікатні, вапняні, гіпсові, магнезіальні, шлаколужні, полімерні, асфальтові бетони. Цементні бетони можна поділити на бетони, виготовлені на портландцементі, шлакопортландцементі, пуцолановому цементі, глиноземістому цементі. Цю класифікацію можна поглиблювати, розглядаючи бетони на різних видах портландцементу та інших в'язучих.

Укрупнена класифікація бетонів запропонована в ДСТУ БВ.2.7–221:2009 "Бетони. Класифікація і загальні технічні вимоги". Вона пропонує класифікувати бетони за основним призначенням, виду в'язучого, виду заповнювачів, структурі та умовам тверднення (табл.1.3).

Таблиця 1.1

Класифікаційні ознаки для бетону

№ п/п	Група класифікаційних ознак	Класифікаційні ознаки	№ п/п	Група класифікаційних ознак	Класифікаційні ознаки
1	Особливості структури	Густина, пористість, ступінь розсуву зерен заповнювача, фазовий склад і особливості кристалізації.	4	Властивості бетону	Середня густина, міцність, деформативі властивості, морозостійкість, водонепроникність, корозійна стійкість, спеціальні властивості.
2	Вид вихідних матеріалів	Вид в'язучого, заповнювача, мікронаповнювача, добавки.	5	Призначення	Для масового застосування, для спеціальних споруд.
3	Умови отримання	Спосіб ущільнення і формування, умови тверднення.			

Найбільш масове застосування мають *конструкційні бетони* - бетони, які застосовуються в несучих і огорожувальних конструкціях будівель і споруд, визначальними вимогами, до якості яких є вимоги за фізико-механічними характеристиками.

Таблиця 1.2

Види бетонів за різними класифікаційними ознаками

Класифікаційна ознака	Основні види бетонів
Вид в'язучого	Цементні, гіпсові, вапняні, силікатні, шлаколу́жні, магнезіальні, полімерцементні та ін.
Густина	Важкі, особливо важкі, легкі, особливо легкі
Вид заповнювача	Щільні, пористі, неорганічні, органічні
Крупність заповнювача	Крупнозернисті, дрібнозернисті, піщані
Легкоукладальність бетонних сумішей	З наджорстких, жорстких, рухомих, литих сумішей
Ступінь поризації	Щільні, поризовані, крупнопористі, ніздрюваті
Спосіб ущільнення	Вібровані, трамбовані, пресовані, вібропресовані, вібровакуумовані, центрифуговані, литі, самоущільнювані
Характерні властивості	Високоміцні, швидкотвердіючі, сульфатостійкі, кислотостійкі, низькотермічні, декоративні та ін.
Призначення	Конструкційні, дорожні, гідротехнічні, хімічно стійкі, теплоізоляційні, радіаційно-захисні, електротехнічні, оздоблювальні та ін.

Спеціальними бетонами називають бетони, до яких пред'являють спеціальні вимоги відповідно до їх призначення. Розвиток будівництва призводить до розширення сфери застосування бетонів та збільшення кількості спеціальних бетонів.

За останні десятиліття в технології як конструкційних, так і спеціальних бетонів все ширше застосовують високоякісні бетони нового покоління (*High Performance Concrete - HPC*). Ці бетони отримують на основі бетонних сумішей високої рухомості, вони мають високу міцність, як в проектному, так і в ранньому віці, характеризуються стабільністю об'єму, низькою стисливістю, високою непроникністю, хімічною стійкістю, морозостійкістю, бактерицидністю, фунгіцидністю та іншими характеристиками, що відповідають національним і міжнародним стандартам.

Таблиця 1.3

Класифікація бетонів по ДСТУ БВ.2.7 -221 :2009

Класифікаційні ознаки	Види бетону	Класифікаційні ознаки	Види бетону
Основне призначення	Конструкційні, Спеціальні (жаростійкі, хімічно стійкі, декоративні, радіаційно-захисні, теплоізоляційні та ін.)	Структура	Зі щільною, поризованою, ніздрюватою, крупнопористою структурою
Вид в'язучого	На цементних, вапняних, шлакових, гіпсових, спеціальних в'язучих	Умови тверднення	Тверднуть в природних умовах, при тепловологісній обробці (ТВО) при атмосферному тиску, в умовах підвищеного тиску
Вид заповнювача	На щільних, пористих і спеціальних заповнювачах		

В даний час активно впроваджується технологія різних різновидів НРС – бетонів, що самоущільнюються (*Self Compacted Concrete - SCC*), реакційно-порошкових бетонів (*Reactive Powder Concrete - RPC*), високоміцних фібробетонів (*High Performance Fiber Reinforced Concrete*) та ін. Створення таких бетонів з комплексом унікальних властивостей стало можливим завдяки комплексу прогресивних технологічних рішень і в першу чергу використанню сучасних органічно-мінеральних модифікаторів, до складу яких входять суперпластифікатори, високоактивні мінеральні та інші добавки.

Застосування ефективних добавок - суперпластифікаторів в поєднанні з високоактивними

ультрадисперсними мінеральними добавками типу мікрокремнезема, а також дисперсних армуванням бетону має революціонізуючий вплив на технологію бетону, дозволяє радикальним чином впливати на його структуру і властивості.

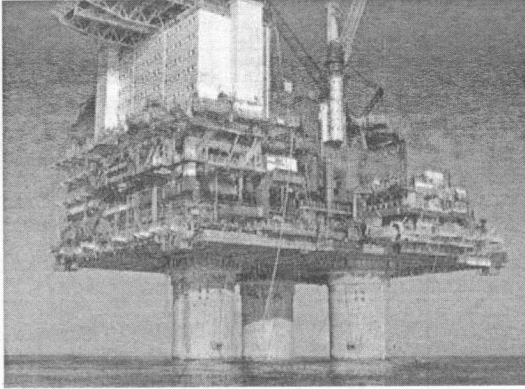


Рис. 1.1. Норвежська нафтова платформа в Північному морі

Застосування бетонів нового покоління ефективно при зведенні і спеціальних споруд. Такі споруди були першими, де з успіхом використані бетони НРС. У 1995 р в Норвегії зведена платформа для видобутку нафти в Північному морі (рис.1.1), розрахована на вплив ураганного шторму з максимальною висотою хвилі 31.5 м. Її повна висота 472 м, що в півтора рази перевищує висоту Ейфелевої вежі. Висота залізобетонної частини складає 370 м. Платформа встановлена на ділянці моря глибиною більше 300 м.

Аналогічні платформи побудовані на шельфі Північного Льодовитого океану в 200 ... 400 км від берегів Аляски, що експлуатуються в зоні суцільного льодового покриву, переміщення якого розвивають величезні зусилля. У конструкції платформ при густому армуванні (800 кг сталі на 1 м^3 залізобетону) укладено бетон міцністю 120 МПа з використанням багатокomпонентних комплексних модифікаторів.

Розроблені проекти платформ, розраховані на глибини до 500 м (рис.1.2).
До унікальних споруд, зведених із застосуванням НРС, можна віднести також міст через протоку Акасі в Японії з головним прольотом 1991 м (рис.1.3), міст через протоку Нордамберленд в Східній Канаді з терміном служби 100 років

довжиною 12,9 км, споруджений на опорах, які занурені в воду на глибину понад 35 м. та ін., в різних країнах світу зводяться висотні будівлі з застосуванням високоміцних бетонів (рис.1.4).

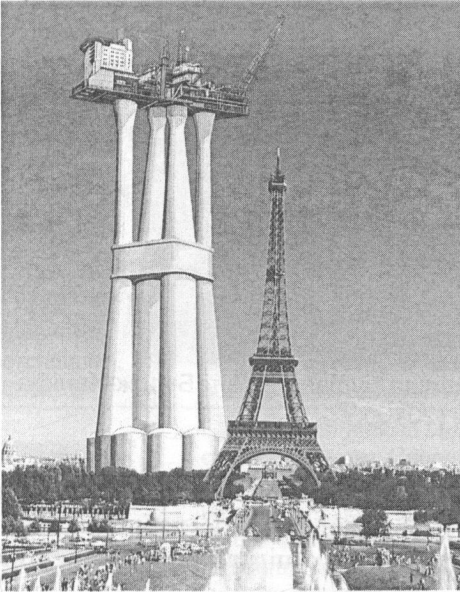


Рис.1.2. Плавуча нафтова залізобетонна платформа у порівнянні з Ейфелевою вежею.

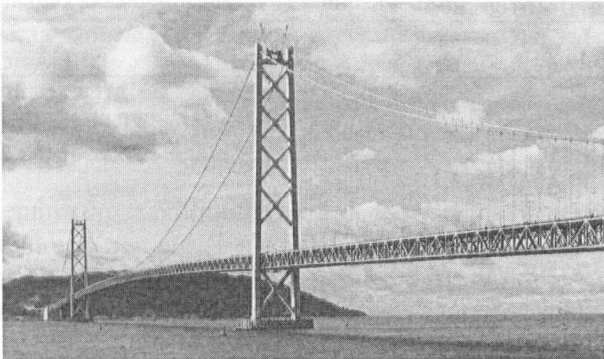


Рис.1.3. Висячий міст Акасі - Кейко між островами Хонсю і Сікю (Японія). Головний проліт 1991м. (1998р.)



Рис.1.4. Найвища будівля в світі Бурдж-Халіфа (ОАЕ) 828 м, (2010р.)

Поряд з бетонами нового покоління в будівництві успішно застосовують бетони, досить добре відомі, досвід практичного застосування яких підтвердив їх ефективність і довговічність.

Технологія бетонів динамічно розвивається, розкриваючи нові можливості цього універсального будівельного матеріалу

2. ГІДРОТЕХНІЧНІ БЕТОНИ

2.1. Загальні вимоги. Вихідні матеріали

Гідротехнічні бетони призначені для виготовлення конструкцій і зведення споруд, які постійно чи періодично знаходяться у воді. Широко застосовуються бетони цього виду при зведенні гідроенергетичних, гідромеліоративних, транспортних споруд, споруд промислової гідротехніки, водопостачання і каналізації та ін. (табл.2.1).

Таблиця 2.1

Галузі застосування гідротехнічних бетонів

Галузь будівництва	Основні види споруд
Будівництво гідротехнічних споруд	Бетонні греблі, канали і водоскиди, рибопропускні споруди, будівлі електростанцій, насосні станції, водопроводи акумулюючих електростанцій та ін.
Транспортне будівництво	Судноплавні шлюзи і підйомники, портові споруди, шлюзи. Споруди причалів, суднобудівних і судноремонтних підприємств, навігаційні споруди, судна та ін. Опори мостів, підземні і підводні тунелі, споруди поромних переправ, дамби, споруди метрополітену та ін.
Будівництво споруд промислової гідротехніки, водопостачання і каналізації	Градірні, резервуари, відстійники, басейни теплоенергетичних комплексів, очисні споруди та насосні станції, водозабори, колектори та ін.
Гідромеліоративне будівництво	Облицювання каналів, акведуки, дюкери, труби, дренажні пристрої, канали – лотки та ін.
Будівництво споруд для видобутку нафти та інших корисних копалин	Опори морських бурових установок, галереї, штольні, підземні камери, штреки та ін.

Перші гідротехнічні бетони, які отримували на основі вапна та вулканічного попелу (пуцолани) застосовували ще римляни до нашої ери. Греблі на основі цементного бетону почали зводитися в різних країнах від початку ХХ ст. Цьому сприяли висока технологічність бетону, можливість забезпечення необхідних властивостей цього матеріалу з врахуванням особливостей експлуатації його в конструкціях і спорудах.

В 20-30 роки ХХ ст. побудовані бетонні греблі в США – Боулдер Гувер (рис.2.1), Норріс і Хайвоссі, в Німеччині – Шварценбах і Блейлок, у Франції – Соте, Марезж, в СРСР – Волховська, Нижньо-Свірська, Дніпровська ГЕС (рис.2.2) та ін.

У 60-70 роках розпочинається будівництво висотних бетонних гребель: Братської ГЕС (125 м, об'єм бетону 4415 тис. м³), Красноярської ГЕС (124 м, 4600 тис. м³), Саяно-Шушенської ГЕС (240 м, 8730 тис. м³) (рис.2.3) та ін.

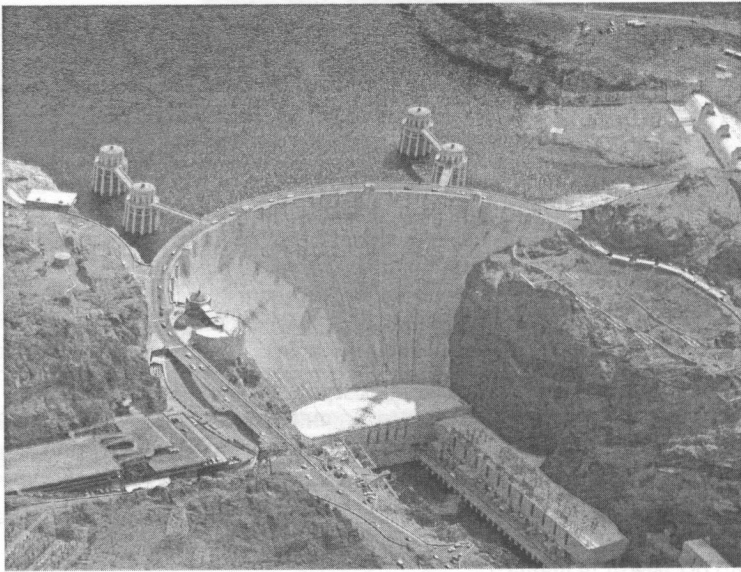


Рис.2.1. Гребля Гувера на р. Колорадо у США

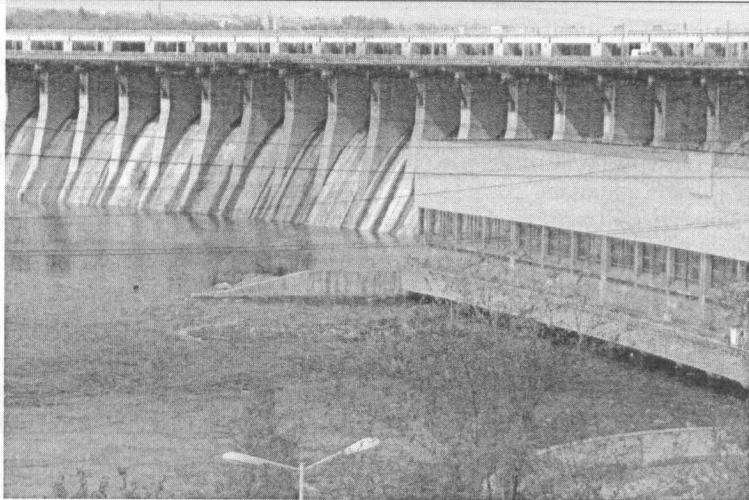


Рис.2.2. Дніпровська ГЕС на р. Дніпро в Україні

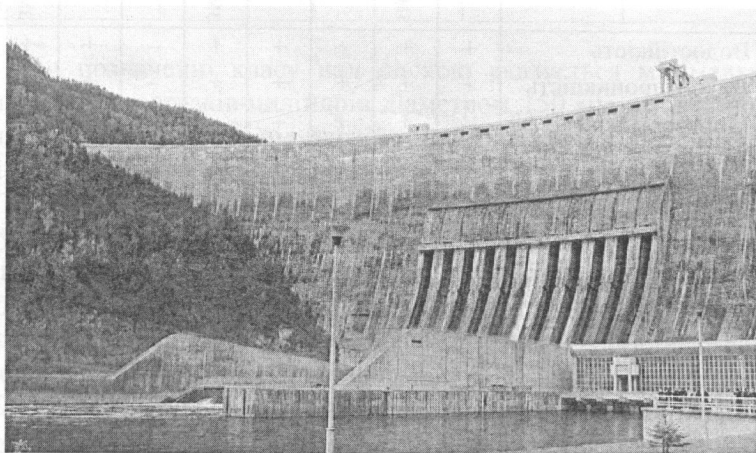


Рис.2.3. Саяно-Шушенська ГЕС на р. Єнісей в Росії

Залежно від розташування бетону в споруді по відношенню до рівня води він поділяється на *підводний*, *зони змінного рівня*

води, надводний. Бетон у підземних гідротехнічних спорудах розглядається як підводний. Конструкції із застосуванням гідротехнічного бетону поділяють на масивні та немасивні. Масивні конструкції вимагають спеціальних заходів для регулювання температурних напружень, які виникають при виділенні теплоти в бетоні.

Вимоги до гідротехнічного бетону пред'являються диференційовано з врахуванням його зонального розподілу в конструкціях (табл.2.2).

Таблиця 2.2

Вимоги до гідротехнічного бетону по зонах

Вимоги до бетону	Масивні споруди					Немасивні споруди			
	Зовнішня зона					Внутрішня зона			
	Зони відносно рівня води								
	підводна	змінного рівня	надводна	підводна	змінного рівня	надводна	підводна	змінного рівня	надводна
Водостійкість	+	+	+	+	+	-	+	+	+
Водонепроникність	+	+	+	+	+	-	+	+	+
Морозостійкість	-	+	+	-	-	-	-	+	+
Низьке тепловиділення	+	+	+	+	+	+	-	-	-

Примітка. Знак “+” означає те, що вимога пред'являється.

Комплекс проектних вимог до гідротехнічних бетонів забезпечується вибором вихідних матеріалів і добавок, проектуванням складів бетонних сумішей відповідно до умов експлуатації з врахуванням рекомендованих обмежень (табл.2.3).

Для важкого бетону, міцність у проектному віці характеризується за ДСТУ БВ.2.7-176:2008 класами (С)(У) нормативних документах для ряду бетонів розглянутих в цьому посібнику, класи позначаються буквою «В»):

C8/10, C10/12,5, C12/15, C15/20, C18/22,5, C20/25, C25/30, C28/35, C32/40, C35/45, C40/50, C45/55, C50/60.

2. Гідротехнічні бетони

Для високоміцних бетонів встановлені класи за міцністю на стиск: C55/67, C60/75, C70/85, C90/105, C100/115.

Таблиця 2.3

Рекомендовані гранично допустимі величини В/Ц для гідротехнічного бетону

Зона й умови експлуатації	Немасивні залізобетонні конструкції у воді		Зовнішня зона конструкцій масивних споруд у воді	
	морській	прісній	морській	прісній
Зона змінного рівня в кліматичних умовах: особливо суворих суворих помірних	0,42	0,47	0,45	0,48
	0,45	0,50	0,47	0,52
	0,50	0,55	0,55	0,58
Підводна зона: напірна безнапірна	0,55	0,58	0,56	0,58
	0,60	0,62	0,62	0,62
Надводна зона, частково омивана водою	0,55	0,60	0,65	0,65

При позначенні класу над ризикою вказується мінімальна міцність на стиск зразків-циліндрів діаметром 150 мм і довжиною 300 мм у віці 28 діб, МПа, під ризикою – зразків-кубів із ребром 150 мм у віці 28 діб, МПа.

Для кожного класу міцності бетону на стиск встановлюють розрахункові характеристики призмової міцності та міцності на осьовий розтяг, а також деформаційні характеристики.

Під *класом бетону* за міцністю розуміють його нормативну міцність у МПа, що задається зазвичай з забезпечиваністю 95% і визначається за формулою:

$$C = f_{cm} (1 - 1,64V_c), \quad (2.1)$$

де V_c – коефіцієнт варіації міцності бетону; f_{cm} – середнє значення міцності, отримане при випробуванні зразків-кубів із ребром 150 мм.

При переході від класу бетону до його середньої міцності при нормативному коефіцієнті варіації 13,5% (0,135) можна використовувати формулу:

$$f_{cm} = C / 0,778 . \quad (2.2)$$

У деяких випадках в якості показника міцності бетону використовують *марку* – нормоване значення середньої міцності. Відмінність між класом і маркою полягає в надійності нормованої міцнісної характеристики, якщо для класу вона становить 0,95, то для марки – 0,5.

В табл.2.4 наведено співвідношення між основними класами і марками важкого бетону за міцністю на стиск.

Таблиця 2.4

Співвідношення класів і марок бетону за міцністю на стиск

Клас бетону за міцністю, С	Середня міцність бетону, МПа, f_{cm}	Найближча марка бетону за міцністю, М	Клас бетону за міцністю, С	Середня міцність бетону, МПа, f_{cm}	Найближча марка бетону за міцністю, М
C8/10	12,18	M150	C28/35	44,99	M450
C10/12,5	16,10	M150	C32/40	51,41	M500
C12/15	19,27	M200	C35/45	57,82	M600
C15/20	25,70	M250	C40/50	64,24	M700
C18/22,5	28,90	M300	C45/55	70,69	M700
C20/25	32,40	M350	C50/60	77,12	M800
C25/30	38,54	M400			

Для бетону конструкцій, що піддаються в процесі експлуатації поперемінному заморожуванню та відтаванню, призначають наступні марки за *морозостійкістю* (F): 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 800, 1000. При обмеженні проникності, необхідності підвищеної щільності і корозійній стійкості бетону призначають марки за *водонепроникністю* (W): 2; 4; 6; 8; 10; 12; 14; 16; 18; 20.

Крім проектних вимог за міцністю, морозостійкістю і водонепроникністю для гідротехнічного бетону у відповідності до умов роботи та норм проектування можливе пред'явлення ряду додаткових вимог, що враховуються при виборі водоцементного відношення (табл.2.3) та інших параметрів складу бетонних сумішей. Проектний вік, у якому повинні бути забезпечені

2. Гідротехнічні бетони

нормовані технічні вимоги, вказують у документації на конструкції. Він призначається згідно норм проектування залежно від умов експлуатації, способів зведення та термінів фактичного завантаження конструкцій. Якщо проектний вік не зазначений, технічні вимоги до бетону повинні бути забезпечені в 28 діб.

Вибір виду і марки (чи класу) *цементу*, його мінералогічного і речовинного складу обумовлені необхідними технічними властивостями бетону і кінетикою зміни їх в часі, разом інших властивостей, що визначають його довговічність у конструкціях і спорудах при заданих умовах їх експлуатації. Для гідротехнічного бетону масивних споруд поширене застосування помірно- та низькотермічних цементів з нормованим хіміко-мінералогічним складом і підвищеним вмістом активних мінеральних добавок. Для бетону, що працює в умовах поперемінного заморожування і відтавання при впливі мінералізованого водного середовища застосовують сульфатостійкі низькоалюмінатні цементы.

Ефективне застосування пластифікованих і гідрофобних портландцементів з добавками ПАР, що дають можливість покращити весь комплекс будівельно-технічних властивостей бетону, знизити витрату в'язучих, енерго- і трудомісткість бетонних робіт. При необхідності швидкого забезпечення достатньої міцності бетону, особливо при виготовленні збірних залізобетонних елементів, застосовують також швидкотверднучі цементы.

До *заповнювачів* для гідротехнічного бетону також як і до цементів вимоги визначаються диференційовано залежно від експлуатаційних умов конструкцій і споруд. Найбільш жорсткі вимоги пред'являються до бетону, що працює в умовах змінного рівня води.

Загальні вимоги до заповнювачів для гідротехнічних бетонів аналогічні вимогам до заповнювачів для інших видів важких бетонів. Крупний заповнювач – щебінь або гравій вибирають, враховуючи його зерновий склад, вміст глинистих і пиловидних частинок, інших шкідливих домішок, міцність і вміст зерен слабких порід, петрографічний склад і радіаційно-гігієнічну характеристику. При підборі складу бетону враховують також густину, пористість, водопоглинання та пустотність зерен заповнювача.

НТБ ВНТУ
м. Вінниця

Для бетону в зоні змінного рівня води застосовують щебінь або гравій із середньою густиною зерен не нижче $2,5 \text{ г/см}^3$ і водопоглинанням не більше 0,5% для заповнювачів з вивержених і метаморфічних порід і 1% - осадових порід. Для бетону внутрішньої, підводної та надводної зон густина зерен крупного заповнювача повинна бути не нижче $2,3 \text{ г/см}^3$, а водопоглинання не більше 0,8% для заповнювача з вивержених і метаморфічних порід, і 2% - осадових порід.

Таблиця 2.5

Базові властивості гірських порід

Породи	Дійсна густина, г/см^3	Границя міцності при стиску, МПа	Модуль пружності, 10^4 МПа	Морозостійкість, цикли
Вивержені інтрузивні:				
граніти	2,53...2,7	100...260	5...8	100...300
габро	2,85...3,05	100...350	9...11	100...300
ефузивні:				
порфіри	2,54...2,66	60...150	6...8	50...200
базальти	2,22...3,07	110...500	8...8,3	50...200
Метаморфічні:				
гнейси	2,0...2,5	10...200	6...7	25...200
кварцити	2,55...2,7	100...250	7...9	100...300
Осадові:				
карбонатні	1,7...2,7	5...200	0,2...9	до 300
піщаники	2,0...2,5	10...250	1,4...5	15...300

Дійсна густина порід, що використовуються для заповнювачів важких бетонів, яка характеризує їх масу в одиниці об'єму в абсолютно щільному стані, змінюється у вузьких межах (табл.2.5) і враховується при розрахунках їх пористості та складів бетонних сумішей.

Середня густина гірських порід залежить від їх пористості й змінюється в широких межах. Цей показник для гірських порід певного мінерального складу і структури може служити побічною характеристикою їх міцності та довговічності.

Пористість вивержених порід зазвичай не перевищує 1,5%, хоча для вивітрених окремих видів вона може досягати 10% і більше; пористість осадових особливо карбонатних порід досягає 40%. Для виробництва щебеню, який застосовується у важкому

бетоні, використовують карбонатні породи, пористість яких знаходиться зазвичай у діапазоні 5...15%.

Відкриту пористість гірських порід характеризує їх водопоглинання. Водопоглинання вивержених порід, які не піддаються процесам вивітрювання, зазвичай не перевищує 0,7%, а в осадових воно досягає 10% і більше.

Щебінь або гравій характеризують зерновим або гранулометричним складом, який визначається шляхом просівання проби через стандартні сита. При цьому розміри отворів сит, на яких залишається чи проходить не менше 95% матеріалу, вважають відповідно найменшою чи найбільшою крупністю заповнювача.

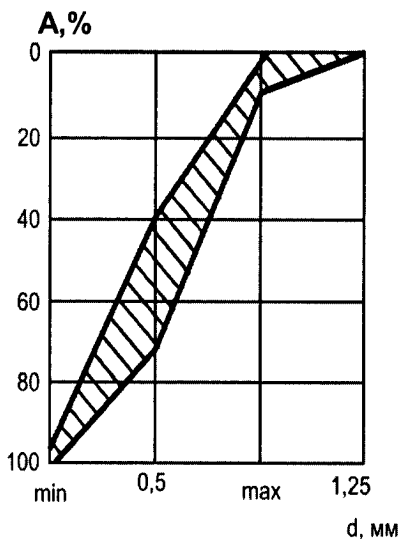


Рис. 2.4. Рекомендований склад крупного заповнювача (A – повний залишок, % на ситах із розміром d)

При приготуванні бетонної суміші крупний заповнювач застосовують у виді окремих фракцій: 5...10 (3...10); 10...20; 20...40; 40...80; 80...120 мм. Допускається також застосування крупних заповнювачів суміжних фракцій. Фракція 3...10 мм застосовується у випадку використання в якості дрібного заповнювача піску з модулем крупності не більше 2,5. При будівництві масивних гідротехнічних споруд допускається застосування щебеню і гравію розміром від 120 до 150 мм і понад 150 мм, що вводяться безпосередньо при укладанні бетонної суміші.

Вміст окремих фракцій у крупному заповнювачі в складі

бетону встановлюється за умови досягнення його найбільшої щільності і перебуває у встановлених межах (табл. 2.6 та рис. 2.4).

На якість заповнювачів суттєво впливає вміст пиловидних, глинистих і мулистих домішок, який визначають зазвичай способом відмулювання. До пиловидних відносять частинки крупністю понад 0,005 до 0,05 мм, до глинистих і мулистих – менше 0,005 мм.

Обмеження вмісту відмулювальних домішок у заповнювачах обумовлено негативним впливом їх на водопотребу бетонних сумішей, а також утворених ними плівок на зчеплення цементного каменю із заповнювачами, і, як наслідок, на міцність, морозостійкість та інші властивості бетону. Для бетону гідротехнічних споруд вміст глинистих і пиловидних частинок у крупному заповнювачі (незалежно від виду породи), не повинен перевищувати 1% для бетону зони змінного рівня води та 2% для підводної і внутрішньої зон. При цьому для бетону, що експлуатується в зоні змінного рівня не допускається наявність у крупному заповнювачі глини у вигляді окремих грудок.

Для звичайного важкого бетону при встановленні допустимої кількості пиловидних і глинистих домішок у крупному заповнювачі враховується вид гірської породи: для вивержених і метаморфічних порід у бетонах всіх класів – не більше 1%, осадових порід для бетонів класів В25 і вище – 2%, В20 і нижче – 3% за масою.

Морозостійкість крупних заповнювачів для всіх видів важких бетонів не може бути нижча нормованої марки бетону за морозостійкістю. Для гідротехнічного бетону, до якого пред'являються вимоги за морозостійкістю та кавітаційною стійкістю, використовують щебінь із вивержених порід марки за міцністю не нижче 1000. Необхідна морозостійкість щебеню і гравію нормується з урахуванням середньомісячної температури найбільш холодного місяця в році. Якщо остання коливається від 0 до мінус 10⁰С марка за морозостійкістю щебеню і гравію повинна бути не нижче F100, нижче мінус 10 – F200.

Таблиця 2.6

Рекомендований склад суміші фракцій крупного заповнювача

Найбільша крупність заповнювача, мм	Вміст фракцій у крупному заповнювачі, %				
	від 5 (3) до 10мм	понад 10 до 20 мм	понад 20 до 40 мм	понад 40 до 80 мм	понад 80 до 120 мм
10	100	-	-	-	-
20	25...40	60...75	-	-	-
40	15...25	20...35	40...65	-	-
80	10...20	15...25	20...35	35...55	-
120	5...10	10...20	15...25	20...30	15...50

2. Гідротехнічні бетони

При виготовленні зносостійкого гідротехнічного бетону для щебеню і гравію визначається марка по стираності у поличному барабані, яка повинна бути не нижче Ст-I для заповнювачів з вивержених і метаморфічних порід та Ст-II - осадових порід.

Таблиця 2.7

Втрата маси заповнювачами бетону, % за масою при визначенні марки за дробимістю

Марка заповнювача за дробимістю	Щебінь із осадових і метаморфічних порід	Щебінь із вивержених порід		Гравій
		із інтрузивних	із ефузивних	
1400	-	до 12 вкл.	до 9 вкл.	-
1200	до 11 вкл.	вище 12 до 16 вкл.	вище 9 до 11 вкл.	-
1000	вище 11 до 13 вкл.	вище 16 до 20 вкл.	вище 11 до 163 вкл.	до 8 вкл.
800	вище 13 до 15 вкл.	вище 20 до 25 вкл.	вище 13 до 15 вкл.	вище 8 до 12 вкл.
600	вище 15 до 19 вкл.	вище 25 до 34 вкл.	вище 15 до 20 вкл.	вище 12 до 16 вкл.
400	вище 19 до 24 вкл.	-	-	вище 16 до 24 вкл.
300	вище 24 до 28 вкл.	-	-	-
200	вище 28 до 35 вкл.	-	-	-

Вміст зерен пластинчастої (лещадної) і голчастої форми у крупному заповнювачі не повинен перевищувати 35%.

Міцність щебеню і гравію характеризується маркою за міцністю, яку визначають за його дробимістю при стискуванні (роздавлюванні) у циліндрі. Показник дробимості визначають за втратою маси після роздавлювання проби матеріалу і просіювання її на ситі з розміром отвору вчетверо меншим найменшого розміру зерен випробовуваної фракції згідно табл.2.7.

Додатковою міцнісною характеристикою щебеню є його стираність у поличному барабані. Орієнтовно марці гравію та щебеню за дробимістю 1000 відповідає міцність при стиску 100, 800 – від 80 до 100, 600 – від 60 до 80 МПа, 400 – від 40 до 60 МПа.

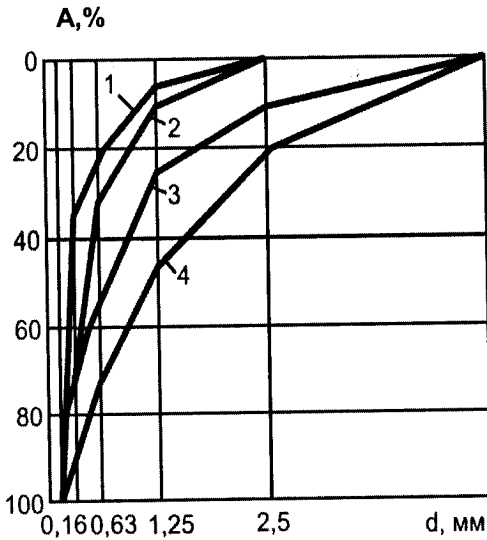


Рис.2.5. Рекомендований зерновий склад піску для бетонів:
 1,2 – нижня границя модуля крупності, що допускається ($M_{кр}=1,5$) і рекомендується ($M_{кр}=2$); 3,4 – верхня границя модуля крупності, що рекомендується ($M_{кр}=2,5$) і допускається ($M_{кр}=2,25$); А – повний залишок на ситах розміром d

порід не допускається більше 5%.

Для піску, який виконує роль дрібного заповнювача бетону визначальними якісними показниками є зерновий склад, вміст пиловидних і глинистих (відмулювальних) частинок та петрографічна характеристика.

Рекомендований зерновий склад піску з умови досягнення максимальної щільності наведений на рис.2.5.

При невідповідності зернового складу природного піску рекомендованим (рис.2.5) вимогам застосовують коригувальні добавки. Для дрібного і дуже дрібного піску це може бути укрупнювальна добавка – більш крупніший пісок у т.ч. пісок з відсівів подрібнення природного каменю. Для крупного піску при

Марка щебеню за міцністю з вивержених порід повинна бути не нижче 800, з метаморфічних порід не нижче 600 та осадових порід – не нижче 300.

Для гідротехнічного бетону застосовують щебінь із природного каменю з маркою не нижче 600 для класів за міцності до С12/15 включно, не нижче 800 для класів від С15/20 до С25/30 та 1200 для класів вище С25/30. Показники дробимості повинні бути для гравію і щебеню із гравію не менше: 800 для бетонів класів С12/15 і нижче, 1000 для бетонів класів С15/20 та вище. У щебеню та гравію для бетону в зоні змінного рівня вміст зерен слабких

2. Гідротехнічні бетони

необхідності коректування зернового складу застосовують, навпаки, пісок з меншим модулем крупності.

Для бетонів гідротехнічних споруд допускається застосовувати пісок з модулем крупності від 1,5 до 3,5 (повний залишок на ситі з розміром отворів 2,5 мм від 0 до 30%, 1,25 мм – від 0 до 55%, 0,63 мм – від 20 до 75%, 0,315 мм – від 40 до 90%, 0,16 мм – від 85 до 100%). При цьому дрібний пісок з модулем крупності рівним або меншим 2,0 використовується при обов'язковому застосуванні пластифікуючих поверхнево-активних добавок.

Вміст глинистих і пиловидних частинок, а також частинок слюди, які часто зустрічаються, при застосуванні піску для бетону гідротехнічних споруд устанавлюється з урахуванням його розташування стосовно води. Для бетону зони змінного рівня води вміст у піску глинистих і пиловидних частинок, а також слюди повинен бути відповідно не більшим 2 і 1%, надводної зони – 3 і 2%, підводної і внутрішньої – 5 та 3%.

Глинисті і пиловидні частинки, що знаходяться у піску, завдяки високорозвиненій поверхні, суттєво збільшують водопотребу бетонних сумішей і, обволікаючи зерна піску, зменшують його зчеплення із цементним каменем. Крім того, найбільш дрібні пиловидні частинки піску (<0,08 мм) знижують морозостійкість бетону. Структуру бетону також погіршують домішки в піску слюди. Повна заміна піску слюдою знижує міцність цементно-піщаного розчину в декілька разів.

До числа шкідливих домішок у заповнювачах бетону, що викликають його корозію і погіршення якості поверхні, відносяться: аморфні різновиди діоксиду кремнію, розчинні в лугах (халцедон, опал, кремій та ін.); сірка, сульфідиди, сульфати, магнетит, гідроксиди заліза. Міцність і довговічність бетону зменшують такі домішки в заповнювачах як вугілля, графіт, горючі сланці, апатит, нефелін, фосфорит. Деякі домішки, які містять водорозчинні хлориди, сірку, сульфідиди та сульфати, можуть викликати корозію арматури у бетоні.

Допустимий вміст шкідливих домішок у заповнювачах для гідротехнічних бетонів наведених в табл.2.8.

У випадку, коли для забезпечення економічної ефективності виготовлення конструкцій і зведення споруд виникає необхідність застосування заповнювачів з показниками якості нижче зазначених

вище, у спеціалізованих центрах виконується їх дослідження для обґрунтування можливості отримання бетону з нормованими властивостями.

Таблиця 2.8

Допустимий вміст шкідливих домішок
у заповнювачах для важких бетонів

Вид домішок	Граничний вміст
Аморфні різновиди діоксиду кремнію, розчинні в лугах, сірка, сульфіді (крім піриту) у перерахунку на SO ₃	не більше 50 моль/л
для крупного заповнювача	не більше 1,5% за масою
для дрібного заповнювача	не більше 1,0% за масою
Шаруваті силікати (слюди, гідрослюди, хлорити та ін.)	
для крупного заповнювача	не більше 15% за об'ємом
для дрібного заповнювача	не більше 2% за масою
Магнетит, гідрослюди заліза, апатит, нефелін, фосфорит	не більше 15% за об'ємом (кожний окремо не більше 10%)
Галоїди в перерахунку на іон хлору	
для крупного заповнювача	не більше 0,1% за масою
для дрібного заповнювача	не більше 0,15% за масою
Азбестове волокно	не більше 0,25% за масою
Вугілля	не більше 1% за масою

Критерієм для прийняття рішення про використання заповнювачів згідно прийнятих радіаційно-гігієнічних норм є питома ефективна активність природних радіонуклідів – $A_{\text{эф}}$. Заповнювачі застосовують без обмежень, якщо $A_{\text{эф}}$ не перевищує 370 Бк/кг (I клас).

Поряд з основними компонентами при отриманні гідротехнічного бетону вводять *добавки* для регулювання властивостей бетонної суміші та бетону, а також для економії цементу. Умовно сукупність можливих добавок можна розділити на дві групи:

1) добавки-модифікатори, які вводять, як правило, у невеликій кількості (від долі відсотка до декількох відсотків від маси цементу);

2) мінеральні добавки, що частково замінюють клінкерну складову портландцементу і виконують роль мікронаповнювачів.

Таблиця 2.9

Види добавок-модифікаторів

Вид добавок	Призначення добавок
Регулюють властивості готових до використання бетонних сумішей	Пластифікуючі Стабілізуючі Регулюючі стабільність рухомості Поризуючі Повітровтягувальні Піноутворюючі Газоутворюючі
Змінюють властивості бетону та регулюють кінетику їх тверднення	Прискорюючі тверднення Сповільнюючі тужавлення Підвищуючі міцність Знижуючі проникність Підвищуючі захисні властивості по відношенню до сталюї арматури Підвищуючі морозостійкість Підвищуючі сульфатостійкість Підвищуючі стійкість до корозії, що викликана реакцією кремнезему заповнювачів з лугами цементу і добавок Регулюючі процеси усадки та розширення
Надають бетонам спеціальних властивостей	Протиморозні Гідрофобізуючі Біоцидні Підвищують стійкість до утворення висолів

Мінеральні добавки залежно від їх здатності хімічно взаємодіяти з гідроксидом кальцію, утвореним при гідратації цементу, називають активними чи інертними.

Згідно до ДСТУ Б В.2.7-171:2008 добавки, які застосовують для модифікування властивостей бетонних і розчинових сумішей, підрозділяють на три види: що регулюють властивості готових до використання сумішей; що змінюють властивості бетонів і розчинів та регулюють кінетику їх тверднення, що надають бетонам спеціальних властивостей (табл.2.9).

Із добавок, що регулюють властивості бетонних сумішей, найбільшого застосування в технології гідротехнічного бетону

набули *пластифікуючі добавки*. Добавки-пластифікатори, відносяться до поверхнево-активних речовин. В якості добавок до гідротехнічних бетонів вони вперше були застосовані в 1949 р. при будівництві Верхньо-Свірської ГЕС. Основний об'єм бетону тут був покладений із застосуванням пластифікуючої добавки – сульфітно-спиртової барди (згідно до сучасної номенклатури – лігносульфонатів технічних (ЛСТ)), що дало можливість зекономити більше 11 тис.т. цементу. На цьому ж будівництві в дослідному порядку почав застосовуватися бетон із повітровтягувальною добавкою СНП (смола нейтралізована повітровтягувальна). Надалі практично при будівництві всіх великих гідротехнічних споруд застосовували пластифікуючі та повітровтягувальні добавки.

В наш час у відповідності з ефективною пластифікуючою дією, тобто збільшенням рухомості бетонної суміші без зниження міцності бетону, пластифікатори поділяють на 4 категорії (табл.2.10).

Таблиця 2.10

Класифікація пластифікаторів бетонних сумішей

Категорія	Найменування	Ефективна пластифікуюча дія (підвищення ОК з 2...4 см), 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 застосовуватись у виробництві бетону на початку 1970-х років. Завдяки ним вдалось значно покращити властивості бетону без збільшення витрати цементу, отримати бетони з литих сумішей і сумішей, що самоущільнюються, з ОК>20 см, високоміцні бетони на звичайному портландцементі і заповнювачах, які характеризуються низькою проникністю, високою корозійною стійкістю і т.д.

Пластифікатори II, III і IV категорії відносять відповідно до сильно- середньо - і слабопластифікуючих добавок.

Повітровтягувальні добавки залежно від хімічної природи поділяють на шість груп:

- 1) солі, отримані з деревної смоли;
- 2) синтетичні миючі засоби;
- 3) солі лігносульфонових кислот;
- 4) солі нафтових кислот;
- 5) солі, отримані з протеїнів;
- 6) солі органічних сульфокислот.

Накопичено значний досвід застосування в гідротехнічному бетоні добавки першої групи, яка отримана при нейтралізації їдким натром деревної смоли після екстракції з неї скипидару. Ця добавка, представлена переважно абіетатом натрію, відома під назвою нейтралізований винсол або смола нейтралізована повітровтягувальна (СНП).

Основне призначення повітровтягувальних добавок – радикальне підвищення морозостійкості бетону в результаті створення раціональної системи повітряних бульбашок для віджимання частини води при заморожуванні.

Поряд із пластифікуючими та повітровтягувальними чи газовиділяючими добавками в сучасній технології гідротехнічного бетону все більшого застосування набувають й інші добавки-модифікатори. Прагнення універсалізувати дію добавок і підсилити їх технічний ефект обумовлює застосування *комплексних (композиційних) добавок-модифікаторів*.

Всі комплексні поліфункціональні модифікатори (ПФМ) можна розбити на чотири групи: I - суміші електролітів; II- суміші ПАР; III- суміші електролітів і ПАР; IV - суміші хімічних і мінеральних добавок.

ПФМ першої групи дають можливість регулювати строки тужавлення, темпи тверднення, захисні властивості бетону по відношенню до арматури. Широкого застосування ПФМ першої групи набули при виробництві бетону в зимовий період.

ПФМ другої групи застосовують для посилення пластифікуючого ефекту, додаткового повітровтягування чи газовиділення, гідрофобізації, економії дорогих суперпластифікаторів.

ПФМ третьої та четвертої груп здійснюють комплексний ефект пластифікації і регулювання темпу тверднення бетону та інших його будівельно-технічних властивостей.

У практиці виробництва гідротехнічного бетону особливо для масивних споруд поширення набули тонкодисперсні *мінеральні добавки*, які вводять із цементом або безпосередньо в бетонні суміші для економії цементу і регулювання ряду властивостей бетону. В гідротехнічному будівництві є досвід застосування як інертних мінеральних добавок (тонкомелений пісок, граніт, вапняк, бентоніт, лес та ін.), так і активних (зола ТЕС, трас, опока, трепел, глієжі та ін.). У СРСР уже в 30-х роках минулого століття на багатьох гідротехнічних об'єктах в бетонну суміш почали вводити активні мінеральні (пуцоланові) добавки. При будівництві Рибінського та Углічського гідровузлів цемент отримували шляхом помелу 65% клінкеру і 35% кварцового піску, а в бетонну суміш додавали ще 20% трепелу. В наш час при будівництві великих гідротехнічних об'єктів найбільшого поширення набуло введення в бетонні суміші в якості активної мінеральної добавки *золи-виносу* теплових електростанцій.

Основним компонентом золи-виносу є склоподібна алюмосилікатна фаза, яка складає 40...65% всієї маси і має вид частинок кулеподібної форми розміром до 100 мкм. Із кристалічних фаз у золі можуть бути присутні α -кварц і муліт, а при підвищеному вмісті Fe_2O_3 також гематит.

Якщо мінеральна частина палива містить значну кількість карбонатів, то в золі утворюються низькоосновні силікати і ферити кальцію, які здатні взаємодіяти з водою.

У невеликій кількості в золі містяться домішки: вільні оксиди кальцію і магнію, сульфати, сульфіді та ін.

У золі, як правило, міститься вуглець у виді різних модифікацій коксових залишків. Їх вміст залежить від виду палива: для бурого вугілля і горючих сланців він становить менше 4%, кам'яного вугілля – 3...12, антрациту – 15...25%. Вміст незгорілих частинок у тонкодисперсних фракціях золи менший, ніж у грубодисперсних.

Хімічний склад золи-виносу коливається залежно від родовищ вугілля (рис.2.6). Приблизний вміст основних оксидів у золі різних ТЕС, %: SiO_2 - 37...63; Al_2O_3 - 9...37; Fe_2O_3 - 4...17; CaO -

2. Гідротехнічні бетони

1...32; Mg - 0,1...5; SO_3 - 0,05...2,5; Na_2O+K_2O - 0,5...5. Втрати при прожарюванні, які характеризують вміст у золі незгорілих вуглецевих частинок, становлять 0,5...20%.

Важливими показниками якості золи є її дисперсність і гранулометричний склад. Дисперсність золи-виносу виражається

зазвичай питомою поверхнею, яку визначають методом повітряпроникності, а також значеннями залишків на ситах при просіюванні. Прямої залежності між цими двома показниками немає. Питома поверхня золи-виносу становить 1000...4000 $см^2/г$. У багатьох випадках вона наближається до питомої поверхні цементу. Золи, які містять велику кількість залишків незгорілого палива, мають більш високі значення питомої поверхні.

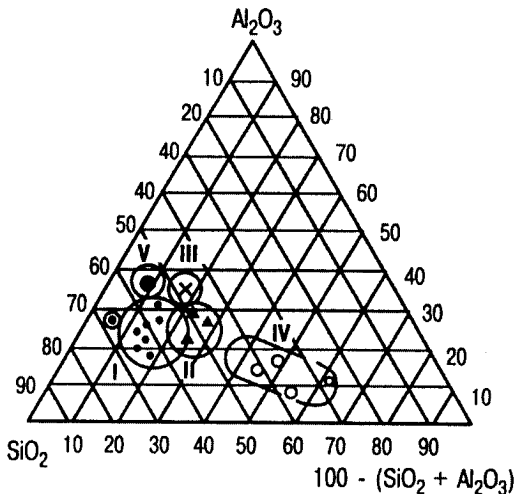


Рис.2.6. Хімічний склад у % золи електростанцій, які працюють на вугіллі різних басейнів:

I...V – відповідно Кузнецького, Донецького, Підмосковного, Кансько-Ачинського, Екібастузького

Гранулометричний склад золи коливається в широких межах: розміри зерен 1...200 мкм. У золі-виносу вміст фракції більше 85 мкм зазвичай не перевищує 20%. Близько 50% частинок золи мають розміри 30...40 мкм. Більш крупна зола утворюється при підвищеному вмісті в мінеральній частині палива оксидів CaO та Fe_2O_3 .

Залежно від області застосування золу підрозділяють на види: I - для залізобетонних конструкцій і виробів; II - для бетонних конструкцій і виробів; III - для конструкцій гідротехнічних споруд, а також на класи - для важкого (А) і легкого (Б) бетону.

Питома поверхня золи класу А повинна бути не менше 800 $см^2/г$, а золи класу Б - знаходиться в інтервалі

1500...4000 см²/г. Залишок на ситі №008 для золи класу А не повинен перевищувати 15% за масою. Хімічний склад і вологість золи повинні відповідати вимогам, зазначеним у табл.2.11.

Таблиця 2.11

Вимоги до золи як добавки в бетон

Показники	Значення показників для золи виду (класу)		
	I (А і Б)	II (А і Б)	III (А)
Вміст SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ , % за масою, не менше, для золи: антрацитової і кам'яновугільної	70	Не нормується	70
буровугільної	50	Те ж саме	50
Вміст сірчаних і сірчаноокислих сполук у перерахунку на SO ₃ , % за масою, не більше	3	3,5	3
Вміст вільного оксиду кальцію (СаО), % за масою, не більше	3	5	2
Вміст оксиду магнію (MgO), % за масою, не більше	5	5	5
Втрати при прожарюванні, % за масою, не більше, для золи: антрацитової	15	20	5
кам'яновугільної	7	10	5
буровугільної	5	5	3
Вологість, % за масою, не більше	3	3	3

Таблиця 2.12

Вимоги до пуцоланових добавок і золи-виносу (стандарт США)

Показники	Клас мінеральної добавки		
	N	F	C
Мінімальний вміст SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ , %	70	70	50
Вміст SO ₃ , %, не більше	4	5	5
Вологість, %, не більше	3	3	3
Втрати при прожарюванні, %, не більше	10	6	6
Залишок на ситі з розміром отворів 45 мм, %, не більше	34	34	34
Автоклавне розширення чи усадка, %, не більше	0,8	0,8	0,8

2. Гідротехнічні бетони

Стандарт США встановлює склад і вимоги до трьох класів мінеральних добавок, що вводяться у бетонну суміш (табл.2.12):

- клас N - сирі та випалені натуральні пуцолани (діатоміти, сланці, туфи, пемза);

- клас F - зола-виносу, отримана при спалюванні антрацити
чи бітумінозних видів вугілля;

- клас C - зола-виносу, отримана з бурого вугілля.

Таблиця 2.13

Допустимий вміст шкідливих домішок у воді для бетону

Призначення води	Максимально-допустимий вміст, мг/л			
	розчинних солей	іонів SO_4^{2-}	іонів Cl^{-1}	зважених частинок
Для замішування бетонної суміші при виготовленні попередньо напружених залізобетонних конструкцій	2000	600	350	200
Для замішування бетонної суміші при виготовленні конструкцій із ненапруженої арматури, у т.ч. для водоскидних споруд і зони змінного рівня води масивних споруд	5000	2700	1200	200
Для замішування бетонної суміші при виготовленні неармованих конструкцій, до яких не пред'являються вимоги по обмеженню утворення висолів, а також бетону конструкцій підводної і внутрішньої зон масивних споруд	10000	2700	3500	300
Для промивання заповнювачів	5000	2700	1200	500
Для поливання робочих швів при перервах у бетонуванні, поверхонь стиків, що підлягають замоноличуванню, і поверхонь водоскидних конструкцій, а також для трубного охолодження масиву бетону	1000	500	350	200
Для поливання закінчених зовнішніх поверхонь бетонних і залізобетонних конструкцій	5000	2700	1200	500
Для поливання зовнішніх поверхонь конструкцій, якщо на поверхні може бути допущена поява цвілі та висолів	35000	2700	20000	500

До високоактивних мінеральних добавок у бетон, які все ширше застосовуються в останні десятиліття відносяться ультрадисперсні відходи виробництва феросплавів, т.зв. *мікрокремнезем* (МК). Мікрокремнезем представляє собою конденсований аерозоль, що вловлюється фільтрами систем газоочистки плавильних металургійних печей. Він містить частинки сферичної форми із середнім діаметром 0,1 мкм і питомою поверхнею 15...25 м²/г і вище. Його насипна густина – 150...250 кг/м³. За хімічним складом МК представлений в основному некристалічним кремнеземом, вміст якого зазвичай перевищує 85 і досягає 98%.

Поряд з мікрокремнеземом використовують також високоактивний *метакаолін*, отриманий при помірному випалі каолінових глин.

Для замішування бетонної суміші використовується вода що відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.7-273:2011. У воді обмежується до 10 мг/л вміст органічних ПАР, цукру та фенолу, не допускаються плівки нафтопродуктів, водневий показник не повинен бути меншим 4 і більше 12,5. У воді замішування обмежується вміст розчинних солей, іонів SO₄⁻² та Cl⁻, а також зважених частинок(табл.2.13).

Допускається застосування технічної і природної води, забрудненої стоками, які містять домішки в кількості, що перевищує норми, зазначені в табл.2.13, крім домішок SO₄⁻² і Cl⁻, за умови обов'язкової відповідності якості бетону показникам, установленим проектом.

2.2. Бетон для масивних гідротехнічних споруд

До масивних відносяться бетонні і залізобетонні конструкції та споруди, розмір яких у поперечнику може досягати декількох метрів. Найбільш характерними масивними спорудами є бетонні греблі. Наприклад, гравітаційні бетонні греблі можуть мати розмір у поперечному напрямку кілька десятків метрів. До масивних бетонних конструкцій відносяться також конструкції шлюзів, пірсів, мостові опори, підпірні стіни, фундаменти під енергетичне і технологічне встаткування та ін.

2. Гідротехнічні бетони

У греблях і їх елементах залежно від умов роботи бетону в експлуатаційний період розрізняють чотири зони (рис.2.7):

I) зовнішню, яка перебуває під атмосферним впливом, не омивається водою;

II) змінного рівня води (зовнішні частини гребель у межах коливань рівнів води у верхньому і нижньому б'єфах, а також частини й елементи гребель, що періодично піддаються дії потоку.);

III) підводну (зовнішні, а також, що примикають до основнижнього б'єфів);

IV) внутрішню (частини гребель, обмежені зонами I...III).

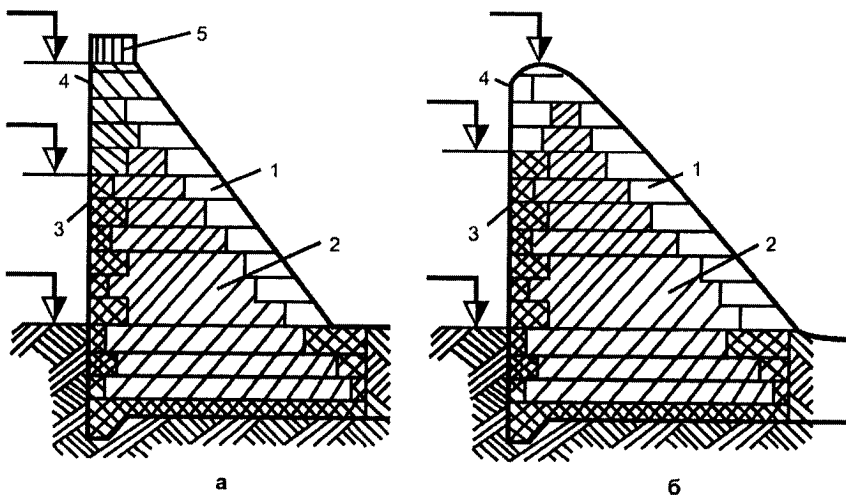


Рис.2.7. Схеми гребель: а – глуха гребля; б – водозливна гребля; 1 – бетон зовнішньої зони; 2 – внутрішньої зони; 3 – підводний; 4 – зони змінного рівня; 5 - надводний

До бетону різних зон бетонних і залізобетонних гребель всіх класів пред'являють вимоги, наведені в табл.2.14.

Вимоги до бетону, бетонних і залізобетонних гребель

Вимоги	Зони гребель	
	бетонних	залізобетонних
Міцність на стиск	I,II,III,IV	I,II,III
Міцність на розтяг	I,II,III	I,II,III
Водонепроникність	II,III	II,III
Морозостійкість	I,II	I,II
Гранична розтяжність	I,II,III,IV	не пред'являється
Стійкість проти агресивного впливу води	II,III	II,III
Опір стиранню потоком води при наявності наносів	II	II
Стійкість проти кавітації при швидкості води 15 м/с і більше	II	II
Тепловиділення при твердненні бетону	I,II,III,IV	Пред'являється при відповідному обґрунтуванні

Конкретні показники тих чи інших властивостей бетону, що відповідають вимогам, наведеним у табл.2.14, призначають диференційовано відповідно до конструктивних особливостей споруд і фактичних умов роботи різних зон. Для прикладу на рис.2.8 наведені проектні показники властивостей бетону у відповідності до його зонального розподілу для греблі Братської ГЕС.

Однієї з основних якісних характеристик бетону є його *міцність на стиск*. Термін тверднення (вік) бетону, що відповідає його класам за міцністю на стиск, осьовий розтяг і марці за водонепроникністю приймається, як правило, для конструкцій річкових гідротехнічних споруд 180 діб, для збірних і монолітних конструкцій морських і річкових портових споруд 28 діб. Строк тверднення бетону, що відповідає його проектній марці за морозостійкістю приймається 28 діб, для масивних конструкцій, що зведені у теплій опалубці, 60 діб. Коли відомі строки фактичного навантаження конструкцій, способи їх зведення, умови тверднення бетону, вид та якість використаного цементу, то допускається встановлювати клас бетону в іншому віці.

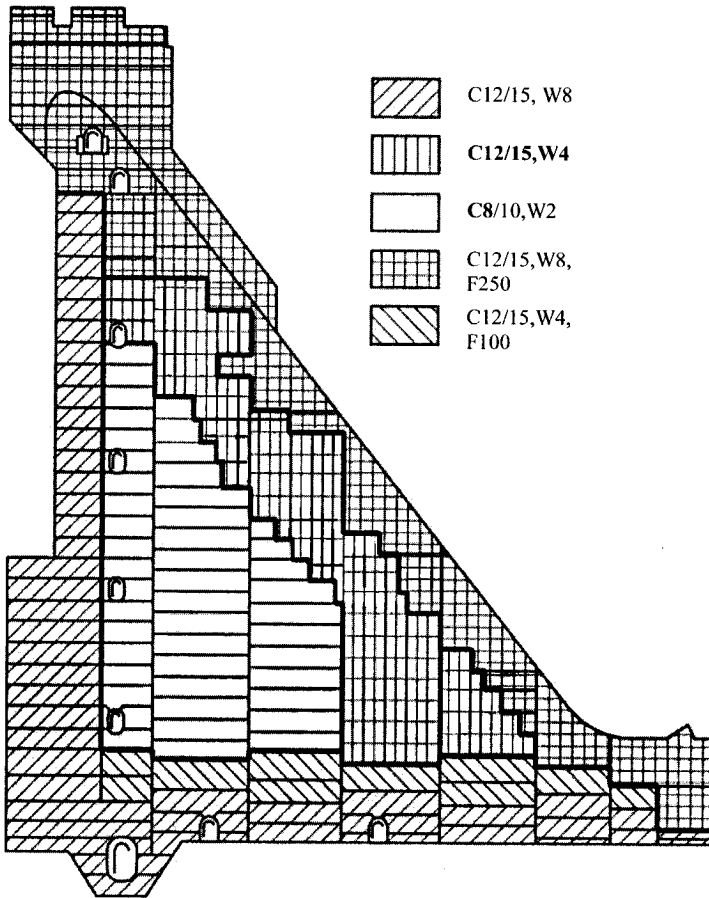


Рис. 2.8. Зональний розподіл бетону в секції водозливної греблі Братської ГЕС

Зміна міцності бетону в часі так само, як зміна його інших технічних властивостей залежить від мінералогічного і речовинного складу цементу, структури і складу бетону, умов його тверднення. Підвищення міцності бетону в часі обумовлено зниженням його пористості, збільшенням ступеня гідратації цементу і проходженням ряду процесів, що призводять до збільшення як

когезії частинок цементу між собою, так і адгезії їх до заповнювачів бетону.

При сприятливих температурно-вологісних умовах міцність бетону росте протягом багатьох років (рис.2.9). Випробуванням, наприклад, кернів, вибурених з акведуків насосних станцій каналу ім. Москви, побудованих в 1937 р., установили, що міцність бетону через 35 років зростає приблизно в 3,5 рази. Випробування кернів, вибурених із греблі Земо-Авчальської ГЕС після 40 років експлуатації, показало, що міцність бетону водозливної греблі зростає в 2,6 рази, а «бичків» в 2,7 рази. Подібні результати отримані при випробуванні властивостей бетону гідротехнічних споруд у багатьох країнах.

Інтенсивність росту міцності бетону за хіміко-мінералогічним складом суттєво відрізняється для бетонів на цементах різних груп. Найбільш інтенсивне наростання міцності після місячного віку виявляють бетони на белітових портландцементях, значно менш інтенсивне наростання міцності в бетонів на алітових цементах і найменший приріст міцності показують бетони на алюмініатних цементах (табл.2.15). Як видно з табл.2.15, інтенсивність росту міцності зменшується по мірі збільшення її вихідного значення.

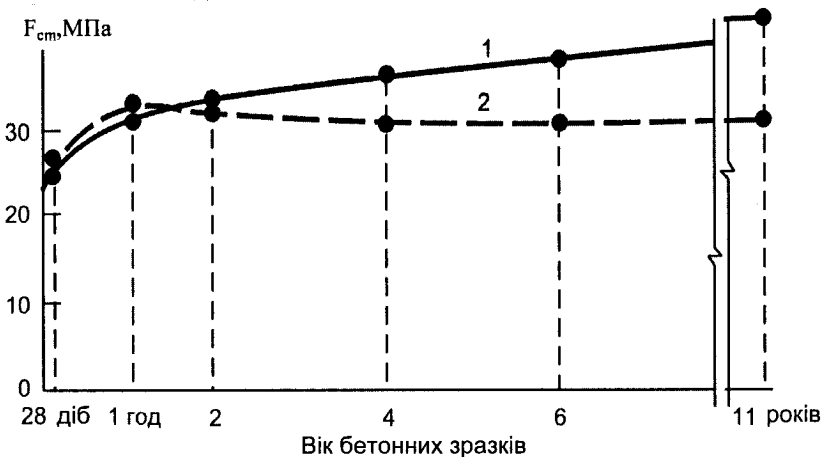


Рис.2.9. Наростання міцності бетону в часі у вологому(1) і сухому (2) середовищі

Коефіцієнти наростання міцності бетону
на портландцементях різного мінералогічного складу

Вік бетонів на цементях	Белітовому		Алітовому		Алюмінатному	
	Вихідна міцність, МПа					
	12	15	21	30	34	47,5
1 міс.	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
3 міс.	1,5	1,25	1,3	1,25	1,1	1,14
6 міс.	1,8	1,4	1,41	1,37	1,3	1,18
1 рік	2,0	1,6	1,6	1,5	1,4	1,3
2 роки	2,3	1,8	1,7	1,66	1,47	1,5
3 роки	2,5	1,9	1,8	1,75	1,56	1,6
5 років	2,7	2,0	1,9	1,87	1,6	1,7
10 років	2,7	2,2	2,0	2,0	-	-
20 років	3,0	-	2,0	2,1	-	-
30 років	3,3	-	-	-	-	-

Для орієнтовного прогнозування росту міцності бетону в часі може бути використано лінійне відношення між міцністю f_{cm_n} і логарифмом тривалості тверднення n при $n \geq 3$ доби і $t = 15 \dots 20^\circ\text{C}$ (формула Б. Г. Скрамтаєва):

$$f_{cm_n} = f_{cm_{28}} \frac{\lg n}{\lg 28} \quad (2.3)$$

Розрахункові коефіцієнти росту міцності бетону, отримані за формулою (2.3), наведені нижче:

доба	3	7	14	28	90	180	365
коефіцієнти	1,33	0,58	0,79	1,0	1,35	1,56	1,77

О.В. Саталкін, ґрунтуючись на логарифмічному законі наростання міцності бетону, запропонував модифікувати формулу (2.3) і враховувати два значення міцності бетону $f_{cm_{n_1}}$ і $f_{cm_{n_2}}$ у два терміни тверднення:

$$f_{cmn} = f_{cmn_1} + \frac{(f_{cmn_2} - f_{cmn_1})(lgn - lgn_1)}{lgn_2 - lgn_1} \quad (2.4)$$

У формулі (2.4) усувається допущення, що міцність бетону у віці однієї доби дорівнює нулю ($lgn=0$) і представляється можливість врахувати вплив особливостей цементу й інших факторів на швидкість тверднення бетону.

Для бетонів на основі сучасних цементів логарифмічна залежність (2.3) дає, як правило, занижені показники міцності для початкових термінів тверднення (до 28 діб) і завищені для пізніх термінів тверднення.

Для попередніх розрахунків зміни міцності бетону в часі бажано використовувати узагальнені емпіричні коефіцієнти, диференційовані для різних цементів (табл.2.16).

Наростання міцності бетону значною мірою визначається температурно-вологісними умовами тверднення (рис.2.10). Достатня вологість бетону необхідна для нормального протікання процесів гідратації та структуроутворення. Разом з тим, при водонасиченні міцність бетону як і будь-яких інших кам'яних матеріалів знижується.

Таблиця 2.16

Коефіцієнти наростання міцності бетону
на основі різних цементів

Вид цементу	Коефіцієнти міцності бетону у віці, діб			
	7	28	90	180
Портландцементи:				
Алітові	0,65-0,75	1,00	1,10-1,25	1,30-1,40
Звичайні	0,60-0,70	1,0	1,15-1,35	1,30-1,50
Белітові	0,55-0,65	1,00	1,30-1,40	1,45-1,60
Шлакопортландцементи на:				
кислих шлаках	0,40-0,50	1,00	1,40-1,65	1,60-2,00
основних шлаках	0,40-0,50	1,00	1,35-1,65	1,55-1,90
Пуцоланові портландцементи:				
с добавкою туфу	0,50-0,60	1,00	1,45-1,75	1,55-1,90
с добавкою опоки	0,50-0,60	1,00	1,25-1,55	1,40-1,65

К.А. Мальцов запропонував лінійну залежність міцності бетону при стиску і розтягу від вологості:

$$f_{cm_w} = f_{cm_{w_0}} \left(1 - \frac{W - W_0}{a} \right), \quad (2.5)$$

де f_{cm_w} і $f_{cm_{w_0}}$ – міцність бетону при вологості рівної відповідно W і W_0 ; a – емпіричний коефіцієнт, який залежить від складу бетону, його структурних характеристик та інших факторів.

Зі зниженням температури й особливо наближенням її до 0°C тверднення бетону різко сповільнюється, що особливо помітно в ранньому віці.

Класи бетону за міцністю на стиск і розтяг призначаються на підставі відповідних розрахункових опорів, що враховують максимально можливі напруження. У бетоні перших гравітаційних гребель, побудованих в 20-х...30-х роках минулого сторіччя розрахункові стискаючі напруження зазвичай не перевищували 1...1,5 МПа. Наприклад, для греблі Дніпровської ГЕС висотою 62 м у бетоні низової грані вони становили 0,98 МПа. По мірі збільшення висоти гравітаційних гребель збільшуються і максимальні стискаючі напруження, хоча проектна міцність бетону, з якою в значній мірі пов'язані ряд інших необхідних його властивостей, залишається в кілька разів вище розрахункової. Так, для греблі Братської ГЕС при висоті 125 м максимальні розрахункові напруження не перевищили 3,5 МПа, марка бетону була прийнята в 180 добовому віці М200 (С12/15). Для гравітаційних гребель, запроектованих у США висотою близько 200 м рівень максимальних стискаючих напружень становить 5...6 МПа при марочній міцності приблизно в 5 разів вище.

Значно поніше використовується міцність бетону в аркових і арково-гравітаційних греблях, де максимальні розрахункові напруження досягають 10 МПа і більше (табл.2.17). При будівництві таких гребель міцність бетону зростає до 30...50 МПа (табл.2.17).

Для бетону зовнішніх зон масивних гідротехнічних споруд, що працює під впливом розтягувальних напружень, поряд із міцністю на стиск (f_{cm}) призначають також проектну міцність на осьовий розтяг (f_{ct}).

Максимальні розрахункові напруження і марочна міцність бетону для деяких аркових та арково-гравітаційних гребель

Країна	Гребля	Тип греблі та її висота, м	Максимальні розрахункові напруження, МПа	Проектний вік бетону, діб	Марочна міцність бетону, МПа
Росія	Чиркійська	аркова, 231	8,5	180	30
	Саянська	арково-гравітаційна, 240	9,5	180	30
Грузія	Інгурська	аркова, 275,5	10	180	35
Італія	Вайонт	аркова, 265,5	6,8	90	45

Із підвищенням класу бетону за міцністю на стиск зростає і його міцність при розтягу, однак не так інтенсивно як при стиску. Так, якщо для бетону класу С8/10 $f_{ct} \approx 0,1f_{cm}$, то для бетону класу С40/50 $f_{ct} \approx 0,05f_{cm}$.

Величина співвідношення міцності на розтяг і стиск зі збільшенням віку бетону зменшується. За даними В.В.Стольнікова при переході від 3 до 90 діб ця величина зменшується майже в 2 рази. З подальшим збільшенням віку її зниження поступово сповільнюється. Цементи з відносно високим вмістом трикальцієвого силікату мають найбільш низьке співвідношення міцності на розтяг до міцності на стиск у віці 7...28 діб.

Відношення f_{ct}/f_{cm} є одним з показників тріщиностійкості бетону. Це стосується бетонів, приготовлених на карбонатних заповнювачах,шлакопортландцементях, золоцементях та ін.

Тріщиностійкість масивного гідротехнічного бетону залежить також від його граничної розтяжності й усадки.

Для важких бетонів величина *граничної розтяжності* ($\epsilon_{гр}$) (граничної деформації при розтягу) коливається зазвичай від 0,7 до $2,5 \cdot 10^{-4}$. Для орієнтовних розрахунків приймають в середньому $\epsilon_{гр} \approx 1 \cdot 10^{-4}$. Граничну розтяжність бетону для внутрішніх зон масивних споруд приймають зазвичай не менше $5 \cdot 10^{-5}$, для зовнішніх зон не менше $7 \cdot 10^{-5}$. З урахуванням особливостей споруд, кліматичних умов і методів робіт можуть бути встановлені й більш

2. Гідротехнічні бетони

високі вимоги до бетону за величиною граничної розтяжності. Наприклад, для бетону греблі Зейської ГЕС пред'являлись наступні вимоги: $\varepsilon_{гр}$ не менше $7 \cdot 10^{-5}$ для бетону внутрішніх зон і не менше $9 \cdot 10^{-5}$ для зовнішніх зон.

Безпосередні визначення граничної розтяжності бетону пов'язані з досить складними випробуваннями і не завжди дають стабільні результати. Цей параметр якості бетону близький до т.зв. умовної граничної розтяжності (*умовної деформативності*):

$$\varepsilon_y = \frac{f_{ctm}}{E_{дин}}, \quad (2.6)$$

де f_{ctm} – міцність при розтягу, яка визначена способом розколювання зразків-кубів або циліндрів; $E_{дин}$ – динамічний модуль пружності.

Для забезпечення тріщиностійкості бетону необхідне виконання умови:

$$\sigma \leq \frac{\varepsilon_{гр} E_y}{K_3}, \quad (2.7)$$

де σ_p – розтягувальне напруження; E_y – модуль пружності бетону; K_3 – коефіцієнт запасу ($K_3 \approx 1,2 \dots 2$).

Гранична розтяжність бетону покращується зі збільшенням міцності бетону, при застосуванні цементів без мінеральних добавок, введенні у бетонну суміш ПАР і полімерних добавок.

Однією з властивостей бетону, пов'язаних з його тріщиностійкістю є *усадка*. Хоча усадочні тріщини в масивному гідротехнічному бетоні поширюються зазвичай вглиб споруди на відстань 0,5...1 см і менше, однак внаслідок дії морозу та інших негативних факторів вони можуть спричинити більш значні руйнування. Усадка бетонів коливається в середньому від 0,2 до 0,4 мм/м до річного віку, вона змінюється приблизно пропорційно логарифму часу й особливо швидко збільшується в перші 28 діб. Для гідротехнічного бетону при відносній вологості 60% і температурі 18°C у віці 28 діб лінійна усадка допускається зазвичай не більше 0,3 мм/м ($0,3 \cdot 10^{-3}$), а в 180 діб – 0,7 мм/м ($0,7 \cdot 10^{-3}$).

Усадка бетону при зміні його вологості проходить у дві стадії:

1) коли бетонна суміш знаходиться в пластичному стані (пластична усадка);

2) по мірі тверднення і висихання бетону.

Пластична або первинна усадка бетону відбувається при виділенні води з бетонної суміші в результаті седиментаційного осадження твердих частинок, а також поглинання вологи опалубкою та випаровування.

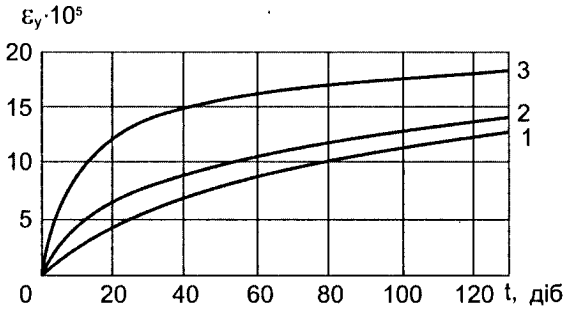


Рис. 2.11 Вплив витрати цементу і водоцементного відношення на усадку бетону трьох складів:

1 – Ц=350 кг/м³, В/Ц=0,45; 2 – Ц=450 кг/м³, В/Ц=0,35; 3 – Ц=450 кг/м³, В/Ц=0,45

ної суміші, витрати цементного тіста, застосуванні тонкомелених водоутримувальних добавок, створенні жорсткого “скелету” крупного заповнювача. В умовах сухого жаркого клімату з підвищенням температури бетонної суміші – водопотреба збільшується. При неналежному вологому забезпеченні і підвищеній швидкості випаровування води створюються умови для пластичного тріщиноутворення. Пластична усадка в 5...10 разів перевищує усадку, яка розвивається після тужавлення цементу. Вона підсилюється зі збільшенням модуля поверхні конструкцій, зменшенням ступеня армування.

На поведінку бетону в конструкціях у значній мірі впливає вологісна чи гідравлічна усадка, яка характерна по мірі висихання бетону.

Деформації інтенсивно розвиваються відразу після укладання і ущільнення бетонної суміші та зникають уже через 30...90 хв. Величина пластичної усадки залежить від складу бетонної суміші і зменшується при зниженні вдовмісту бетон-

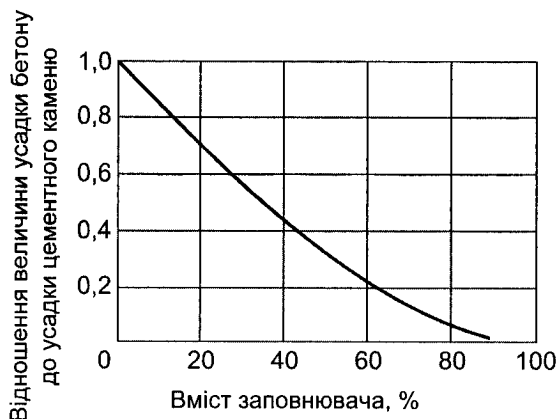


Рис.2.12. Вплив вмісту заповнювача в бетоні (за об'ємом) на величину відношення усадки бетону до усадки цементного каменю

На усадку цементного каменю і бетону впливають численні фактори: тривалість тверднення, хіміко-мінералогічний склад, питома поверхня та витрата цементу, вміст заповнювача, гіпсу і лугів, водоцементне відношення та ін. (рис.2.11...2.14).

Враховуючи те, що хіміко-мінералогічний склад і дисперсність сучасних заводських портландцементів змінюються порівняно у вузькій області і вирішальний вплив має опіснення цементного каменю заповнювачем, вплив особливостей портландцементів на величину усадки бетону виявляється малоістотним. Лише при використанні білітових високоалюмінатних цементів вплив мінералогічної характеристики цементу на усадку бетону може стати досить вагомим.

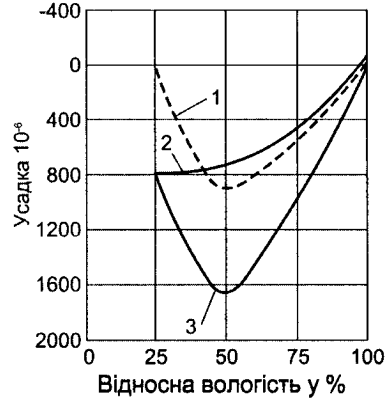
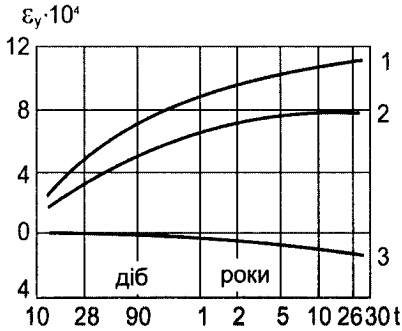


Рис.2.13. Усадка бетону при різній відносній вологості повітря: 1 - $W=50\%$; 2 - $W=70\%$; 3 - $W=100\%$

Рис.2.14. Усадка при висиханні та усадка при карбонізації бетону при різній вологості повітря: 1 - при карбонізації; 2 - при висиханні; 3 – сумарна

На величину усадки бетону впливають пружні властивості заповнювачів. Зерна заповнювачів, покриті оболонкою цементного каменю, перешкоджають усадці тим більше, чим вище їх модуль деформації. Збільшують усадку бетону домішки глинистих частинок у заповнювачах.

Відомі емпіричні формули, запропоновані для прогнозування усадки важкого бетону в атмосферних умовах при незмінних розмірах перетину елементів. Дані формули відрізняються особливостями врахування витрати води і цементу в бетоні та їх співвідношення (табл.2.18).

Вирішальним фактором, який визначає усадку бетону, є витрата води. При незмінній витраті води в суміші величина ε_{yc} мало залежить від витрати цементу та Ц/В. Для інженерних розрахунків найбільш простою і зручною є формула (2.9).

За межами області сталої водопотреби бетонних сумішей ($Ц/В > 1/1,68K_{н.г}$, де $K_{н.г}$ – нормальна густина цементного тіста)

2. Гідротехнічні бетони

витрата води при постійній легкоукладальності повинна корегуватися із врахуванням Ц/В.

Таблиця 2.18

Основні розрахункові формули для прогнозування усадки бетону

№ п/п	Формули	Автори
1	$\epsilon_{yc} \cdot 10^6 = 0,24V^{3/2} \frac{(1 + Ц/В)^{3/2}}{6 + (Ц/В)^2}, \quad (2.8)$ В - витрата води в л/м ³ ; Ц/В- цементно-водне відношення.	Є. М. Щербаков
2	$\epsilon_{yc} \cdot 10^6 = 0,125V\sqrt{В} \quad (2.9)$	Є. М. Щербаков
3	$\epsilon_{yc} \cdot 10^6 = \frac{5В/Ц}{1 + m} (667 + Ц), \quad (2.10)$ m- масове співвідношення між заповнювачем і цементом.	А. Вельмі
4	$\epsilon_{yc} \cdot 10^6 = 5500 \frac{1 + В/Ц}{1 + В/Ц + m} (В/Ц)^2 \quad (2.11)$	Європейський комітет по бетону (ЄКБ)
5	$\epsilon_{yc} \cdot 10^6 = 300 \left[0,7 + 0,15 \left(\frac{Ц - 225}{25} + \frac{В/Ц - 0,4}{0,1} \right) \right] \quad (2.12)$	С.В. Александровський

Прогнозування усадочних деформацій у часі може бути виконане з урахуванням типових залежностей (рис.2.15).

За даними Європейського комітету по бетону (ЄКБ) через 7 діб тверднення усадка становить 0,2; 28 діб – 0,4; 180 діб – 0,7; 365 діб – 0,8 $\epsilon_{yc,m}$ ($\epsilon_{yc,m}$ – гранична деформація усадки).

Поряд з усадкою, яка обумовлена висиханням, бетон піддається усадці в результаті карбонізації за рахунок вуглекислого газу, який наявний в атмосфері. При наявності вологи вуглекислий газ взаємодіє із продуктами гідратації цементу, що супроводжується збільшенням загальної усадки бетону (рис.2.14). Усадка за рахунок карбонізації в значній мірі впливає на загальну усадку після висихання бетону і при поперемінному зволоженні та висушуванні.

Термічна усадка виникає внаслідок зниження температури бетону. Високі перепади температур у літній і зимовий періоди можуть приводити до коливань розмірів бетонних виробів до 0,5 мм/м.

Термічну усадку $\varepsilon_{ус}^T$ можна розрахувати за формулою:

$$\varepsilon_{ус}^T = K_{т.р} \cdot \Delta t, \quad (2.13)$$

де $K_{т.р}$ – коефіцієнт термічного розширення бетону (він коливається від 7 до 14 мкм/м^{°С} і в середньому приймається 10 мкм/м^{°С}), Δt – перепад температур.

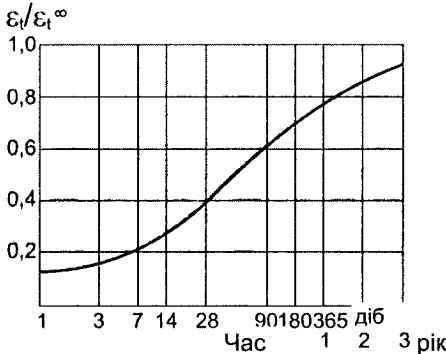


Рис. 2.15. Залежність усадочних деформацій бетону в часі

Термічна усадка може бути причиною тріщиноутворення масивних конструкцій. З часом виникаючі тріщини збільшуються під впливом усадки у зв'язку зі зміною вологості бетону і карбонізації. Для обмеження термічної усадки цементу, температуру суміші при укладанні в опалубку, вибирають заповнювач із високим модулем деформації.

Одним із головних критеріїв стійкості гідротехнічного бетону в умовах поперемінного заморожування та відтавання є *морозостійкість*.

Марку бетону за морозостійкістю призначають залежно від кліматичних умов і числа розрахункових циклів заморожування та відтавання протягом року (за даними довгострокових випробувань) з урахуванням експлуатаційних умов. При помірних кліматичних умовах і числі циклів поперемінного заморожування і відтавання в рік до 50 призначається марка бетону за морозостійкістю F50, більше 50 до 75 – F100; більше 75 до 100 – F150; більше 100 до 150 – F200; більше 150 до 200 – F300.

Для бетону споруд, які працюють у суворих умовах, призначаються марки бетону за морозостійкістю відповідно F100, F150, F200, F300, F400, в особливо суворих умовах – F200, F300, F400, F500, F600.

При помірних кліматичних умовах середньомісячна температура найбільш холодного місяця вище мінус 10, суворих – від мінус 10 до мінус 20°C особливо суворих – нижче мінус 20°C.

Стандартизований метод оцінки морозостійкості бетону характеризується числом циклів заморожування і відтавання зразків при нормованих умовах випробування без суттєвого зниження міцності. Цей метод запропонований в 1886 р. М.А. Белелюбським і дає можливість оцінити стійкість бетону при деякому умовному екстремальному режимі його роботи - повному водонасиченні та безперервному циклічному заморожуванні при загальній тривалості одного циклу 4,5...6,5 год. При основному стандартному способі випробувань заморожування виконується при -18...-20°C на повітрі, а відтавання у воді. Для прискорення випробувань температуру заморожування знижують до -40...-60°C, насичують зразки водним сольовим розчином, зменшують їх розміри і скорочують тривалість циклів.

Часто при випробуванні на морозостійкість для визначення фактичної зміни міцності матеріалу через задане число циклів використовують *коефіцієнт морозостійкості*: $K_{\text{мрз}} = f_{\text{мрз}} / f_{\text{к}}$,

де $f_{\text{мрз}}$ – міцність бетону після прийнятого числа циклів випробувань; $f_{\text{к}}$ – міцність контрольних зразків.

Марка бетону за морозостійкістю вважається забезпеченою, якщо $K_{\text{мрз}} \geq 0,95$.

При призначенні морозостійкості бетону в конкретних конструкціях та спорудах необхідно враховувати такі важливі фактори, як ступінь водонасичення, коливання від'ємних температур, характер напруженого стану бетону та ряд інших.

Відомий дослідник морозостійкості бетону С.В. Шестоперов запропонував оцінювати морозостійкість деякою умовною маркою, яка рівна добутку проектного строку експлуатації споруди, середньорічного числа циклів заморожування та відтавання і коефіцієнта запасу міцності. Для обґрунтування 8 умовних марок (від 25 до 600) їм дані рекомендації з 25 параметрів, що враховують якість вихідних матеріалів, складу бетону та технологію робіт.

В ряді країн, наприклад у США та Канаді, при проектуванні складу бетонів прийнято вказувати не конкретне число циклів заморожування і відтавання, а режим роботи бетону. Для кожного

режиму роботи бетону рекомендується певна область допустимих В/Ц (табл.2.19).

Таблиця 2.19

Максимально допустимі величини водоцементного відношення для бетону різних споруд за рекомендаціями Американського інституту бетону

Тип споруд	Умови служби бетону					
	Суворий клімат з різкими коливаннями температури або частими змінами заморозування і відтавання (використовується лише із втягнутим повітрям)			М'який клімат з рідкими переходами температури через нуль, дощовий або сухий клімат		
	на повітрі	у зоні змінного рівня води		на повітрі	у зоні змінного рівня води	
		у прісній воді	у морській воді		у прісній воді	у морській воді
Парапети, бордюри, пороги шлюзів і доків, армовані палі, труби	0,49	0,44	0,40*	0,53	0,49	0,40*
Підпірні стінки, контрфорси, мостові опори, прогони, балки	0,53	0,49	0,44*	**	0,53	0,44*
Зовнішні частини масивних споруд	0,58	0,49	0,44*	**	0,53	0,44*
Бетон для підводного бетонування	-	0,44	0,44	-	0,44	0,44

* При використанні сульфатостійкого цементу максимально допустимі величини водоцементного відношення можуть бути підвищені на 0,045.

** Величина водоцементного відношення повинна прийматися виходячи з вимог до міцності та легкоукладальності.

Морозостійкість бетону обумовлена насамперед будовою його порового простору. У цементному камені утворюються три види пор: пори цементного гелю, розмір яких знаходиться у межах $(15...40) \cdot 10^{-10}$ м, капілярні пори 0,01 – 1 мкм і умовно замкнуті пори 10...500 мкм.

Пори гелю характеризуються мінімальною проникністю для рідин і газів (коефіцієнт проникності для пор гелю менший 10^{-10} м/с). Перенос рідкої фази в порах гелю можливий лише за механізмом молекулярної дифузії. Вода в порах гелю при експлуатації бетонних і залізобетонних конструкцій не замерзає, що пояснюється їх розміром, вмістом у поровій рідині добавок-електролітів.

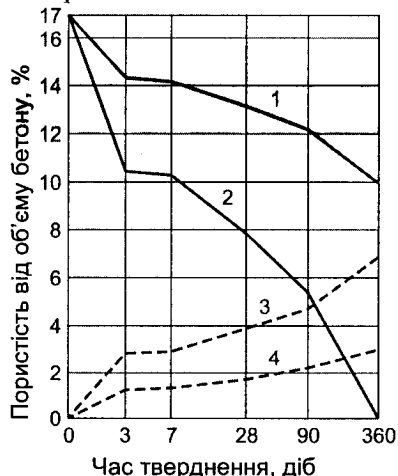


Рис. 2.16. Зміна об'єму основних видів пор у бетоні:

1 – загальна пористість; 2 – капілярні пори; 3 – пори гелю; 4 – контракційні пори

ступінь гідратації цементу, тим більше утвориться гелю і тим менший об'єм залишається на капілярні пори (рис. 2.16).

Одна з перших спроб зв'язати морозостійкість із величиною капілярної пористості була зроблена Г.І. Горчаковим (рис. 2.17).

Для бетону нормального тверднення, виготовленого на стандартних матеріалах, була запропонована залежність виду:

$$F = K (P_{нач.} - P_{к.})^n, \quad (2.14)$$

де F – число циклів заморожування (яке визиває певний ступінь руйнування); K , n , $P_{нач.}$ – параметри, що залежать від якості

Капілярні пори можна представити як частину об'єму води цементного тіста, що не заповнена продуктами гідратації цементу. Мікрокапіляри мають розмір менший 10^{-1} мкм. Вони здатні до капілярної конденсації вологи, яка обумовлює гігроскопічність матеріалів. Макрокапіляри з радіусом більше 0,1 мкм (зазвичай до 10 мкм) заповнюються водою лише при безпосередньому контакті з нею.

Капілярні пори є основним дефектом структури цементного каменю. У свіжоприготовленому тісті порами можна вважати весь простір, заповнений водою. При твердненні частина його заповнюється гелем. Чим більший

матеріалів, складу бетону, виробничих факторів; P_k – капілярна пористість в %.

Показник n для випробуваних бетонів і цементно-піщаних розчинів коливався в межах від 2,7 до 3. Статистична обробка дала можливість конкретизувати наведену вище залежність емпіричним рівнянням:

$$F = (14 - P_k)^{2,7}. \quad (2.15)$$



Рис.2.17. Залежність морозостійкості бетону від капілярної пористості (за Г.І. Горчаковим)

До умовно замкнутих пор відносять пухирці повітря у цементному камені та бетоні. Сумарний об'єм пор, їх розмір, кількість і питому поверхню можна регулювати введенням повітровтягувальних або газоутворювальних добавок. Повітряні пори, отримані шляхом введення в бетонну суміш повітровтягувальних добавок, суттєво змінюють структуру цементного каменю. Число повітряних пор у 1 см^3 цементного каменю може досягати одного мільйона, а поверхня цих пор – $200...250 \text{ см}^2$. Через цю поверхню у повітряні пори надходить надлишкова вода, яка витісняється з капілярів при заморожуванні бетону. Захисною дією володіють лише досить дрібні повітряні пори розміром менше $0,5...0,3 \text{ мм}$.

Об'єм відкритих капілярних пор, які визначають кількість замерзаючої води та морозостійкість бетону, залежить від водоцементного відношення (В/Ц) і ступеня гідратації цементу. Зі збільшенням В/Ц зростає як загальний об'єм відкритих пор, так і їх середній розмір, що також негативно впливає на морозостійкість (рис.2.18). Зниження В/Ц можливе як за рахунок зменшення витрати води при застосуванні пластифікуючих добавок, більш

жорстких сумішей, так і за рахунок збільшення витрати цементу. Другий спосіб зниження В/Ц економічно неефективний.

Друга характеристика, що поряд з В/Ц визначає капілярну пористість бетону – ступінь гідратації цементу, залежить від активності цементу, інтенсивності росту її в часі, тривалості й умов тверднення бетону. Підвищенню ступеня гідратації цементу сприяють різні способи його активізації та належний догляд за бетоном.

За даними Г.І. Горчакова кожен відсоток зниження капілярної пористості досягається зменшенням кількості води замішування на 10 л/м^3 або збільшенням витрати цементу на $20...35 \text{ кг/м}^3$.

Вплив якості цементу на морозостійкість бетону пов'язаний

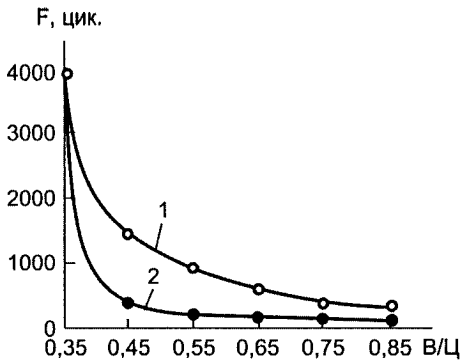


Рис. 2.18. Залежність морозостійкості (F) звичайного бетону – 1 і бетону із втягнутим повітрям 2 від В/Ц

із мінералогічним складом, тонкістю помелу і наявністю активної мінеральної добавки. З мінералів цементу негативний вплив на морозостійкість здійснює C_3A , вміст якого в морозостійких цементах зазвичай не перевищує $5...8\%$.

У морозостійких бетонах небажано використовувати активні мінеральні добавки особливо з підвищеною

водопотребою. В той же час експериментально показано, що бетони з помірним вмістом доменних шлаків або кам'яновугільної золи-виносу можуть мати задовільну морозостійкість особливо при введенні в бетон емульгированого повітря.

Низьку морозостійкість мають пуцоланові цементи. Шлакопортландцементи за морозостійкістю займають проміжне місце між портланд- і пуцолановим цементом.

Жорсткі вимоги пред'являються до обмеження величини втрати при прожарюванні, обумовленої тривалим зберіганням

цементу. Зберігання цементу значно більш впливає на його морозостійкість чим на активність. На думку С.В. Шестоперова наявність оболонки з новоутворень гідратованих мінералів на зернах цементу є однією з основних причин зниження довговічності бетону.

Кварцовий пісок і щебень із щільних вивержених або метаморфічних порід, які зазвичай застосовуються для отримання важкого бетону і відповідають вимогам стандартів, дають можливість отримувати високоморозостійкий бетон.

При сталому В/Ц морозостійкість бетону можна суттєво збільшити введенням у бетонні суміші втягнутого повітря за допомогою добавок ПАР. Основні повітрявтягувальні добавки відносяться до гідрофобізуючих ПАР, які володіють значною поверхневою активністю на границі розчин-повітря. Ці добавки при їх введенні з водою замішування викликають утворення високодисперсної емульсії повітря, стійко диспергованого в бетонній суміші. Повітрявтягувальні добавки виготовляються у вигляді концентрованих розчинів, густих паст або легкорозчинного порошку. Для приготування добавок використовують деревні смоли, продукти переробки нафти, рослинні жири та іншу сировину. Найбільш часто в якості повітрявтягувальних добавок застосовують добавки на основі деревної смоли (смола нейтралізована повітрявтягувальна – СНП, синтетична поверхнево-активна добавка – СПД та ін.). У бетонні суміші їх вводять зазвичай у кількості 0,01...0,02% від маси цементу, при цьому об'єм втягнутого повітря становить 30...60 л/м³. Такий об'єм втягнутого повітря зазвичай суттєво перевищує об'єм води, яка витісняється при заморожуванні. При цьому значення “фактора відстані” між повітряними порами є значно меншим критичного, яке зазвичай приймають 0,25 мм. Морозостійкість бетону з повітрявтягувальними добавками зростає у кілька разів (рис.2.18).

Крім виду й вмісту добавок, на повітрявтягування також впливають інші фактори: легкоукладальність бетонних сумішей, тонкість помелу цементу, зерновий склад заповнювачів, час перемішування, температура.

Поряд із повітрявтягувальними для утворення системи умовно-замкнутих пор у бетоні застосовують газоутворюючі добавки, наприклад, ГКР-94. Є дані, що система умовно-замкнутих

2. Гідротехнічні бетони

пор з добавкою ГКР-94 більш стабільна, чим у бетонах з повітровтягувальними добавками.

Пластифікуючі добавки підвищують морозостійкість бетону як в результаті зменшення водопотреби і відповідно капілярної пористості, так і внаслідок певного повітровтягування.

Для гідротехнічних споруд із нормованою морозостійкістю F200 і вище, які експлуатуються в умовах насичення морською або мінералізованою водою, об'єм втягнутого повітря в бетонній суміші згідно ДСТУ Б В.2.7.-43-96 повинен відповідати значенням зазначеним у табл.2.20.

Таблиця 2.20

Об'єм втягнутого повітря, що рекомендується для гідротехнічного бетону з підвищеною морозостійкістю ($F \geq 200$)

Максимальна крупність заповнювача, мм	Об'єм втягнутого повітря у бетонній суміші, % при В/Ц		
	менше 0,41	0,41...0,50	більше 0,50
10	2...4	3...5	5...7
20	1...3	2...4	4...6
40	1...3	1...3	3...5
60	1...3	1...3	2...4

Водонепроникність гідротехнічного бетону характеризується як прямими показниками (маркою за водонепроникністю або коефіцієнтом фільтрації) так і непрямыми – водопоглинанням і водоцементним відношенням (табл.2.21).

Марка бетону за водонепроникністю (W) визначається найбільшим тиском води (МПа), який можуть витримати стандартні зразки з висотою і діаметром 150 мм без появи на їхній відкритій стороні ознак просочування води.

Коефіцієнт фільтрації води (K_{ϕ}) показує кількість води, яка проникає через одиницю перетину за одиницю часу, при градієнті (відношенні напору в м. водяного стовпа до товщини конструкції в м.) рівному 1.

Значення K_{ϕ} знаходять із рівняння:

$$K_{\phi} = \eta \frac{Q_{\phi} S}{S \tau P} \quad (2.16)$$

Q_{ϕ} – кількість фільтрату; S – площа поверхні зразка бетону; τ – час фільтрації; P – тиск води; η – коефіцієнт, що враховує в'язкість води ($\eta=1$ при $t=20^{\circ}\text{C}$).

Коефіцієнт фільтрації бетону має кореляційний зв'язок з маркою за водонепроникністю, яка наведена в табл.2.21. Однак, є й інші рекомендації. Наприклад, за даними М.Г. Елбакідзе, який виконав широкі дослідження по фільтрації води через бетон, коефіцієнт фільтрації залежить від напору капілярного всмоктування та в середньому дорівнює при: $W4 - 1 \cdot 10^{-8}$; $W6 - 5 \cdot 10^{-9}$; $W8 - 3 \cdot 10^{-9}$.

Таблиця 2.21

Показники проникності бетону

Вид бетону за проникністю	Показники проникності			
	прямі		непрямі	
	марка бетону за водонепроникністю	коефіцієнт фільтрації, см/с (при рівноважній вологості)	водопоглинання, % за масою	водоцементне відношення В/Ц не більше
Н-бетон нормальної проникності	W4	вище $2 \cdot 10^{-9}$ до $7 \cdot 10^{-9}$	вище 4,7 до 5,7	0,6
П-бетон пониженої проникності	W6	вище $6 \cdot 10^{-10}$ до $2 \cdot 10^{-9}$	вище 4,2 до 4,7	0,55
О-бетон особливо низької проникності	W8	вище $1 \cdot 10^{-10}$ до $6 \cdot 10^{-10}$	до 4,2	0,45

Марку бетону за водонепроникністю призначають залежно від величини градієнта напору, тобто відношення максимального напору води до товщини відповідної зони споруди. При напірному градієнті до 5 і температурі контактуючої зі спорудою води до 10°C призначається марка бетону за водонепроникністю W2; 5...10 – W4; 10...15 – W6; 15...20 – W8 і 20...30 – W10.

При температурі води понад 10 до 30°C призначені марки бетону за водонепроникністю збільшуються на одну ступінь при відповідних значеннях напірних градієнтів. Ще на один ступінь (відповідно від W6 до W12) марки бетону за водонепроникністю збільшуються при температурі води понад 30°C . У безнапірних

2. Гідротехнічні бетони

конструкціях морських споруд проектна марка бетону за водонепроникністю повинна бути не нижче W4. Для конструкцій із градієнтом напору понад 30 призначають марки бетону за водонепроникністю W16 і вище.

Для частин і елементів греблі, які періодично омиваються водою, марка бетону за водонепроникністю приймається не нижче W4, при впливі на бетон потоку води з рухомими наносами, а також при кавітаційному впливі води марка бетону за водонепроникністю повинна бути не нижче W8.

Водонепроникність бетону визначається параметрами складу бетонної суміші та технологічними режимами виготовлення конструкцій і зведення споруд.

Можна вважати експериментально доведеним, що водонепроникність бетону визначається не загальною, а наскрізною або *ефективною пористістю*. Під останньою розуміють відношення об'єму пор, які служать шляхами фільтрації, до об'єму зразка. Ефективна пористість змінюється великою мірою залежно від тривалості взаємодії зразків з водою.

У ряді випадків на практиці необхідно оцінити зміну коефіцієнта фільтрації бетону при тривалій дії напору води, тобто з урахуванням самоущільнення бетону. Самоущільнення бетону в природних умовах відмічено багатьма авторами. Так, дані про водонепроникність бетону, визначені на кернах, вибурених у різний час із італійських гребель, свідчать про зниження коефіцієнта фільтрації бетону за період від 90 днів до 27 років на 3 порядки.

Коефіцієнт фільтрації бетону в часі при $\tau > 1$ доби описується експоненціальною функцією:

$$K_{\phi(\tau)} = K_{\phi 0} e^{-(\tau/T)^b}, \quad (2.17)$$

де $K_{\phi(\tau)}$ – коефіцієнт фільтрації бетону через τ діб фільтрації води, м/с; $K_{\phi 0}$ – початковий коефіцієнт фільтрації, який вимірюється у першу добу просочування води через бетон, м/с; b , T – емпіричні параметри функції самоущільнення, які залежать від складу бетону, гідрокарбонатної лужності води та градієнта напору.

Найвні експериментальні дані вказують на можливість значного підвищення водонепроникності бетону в пізній термін тверднення (рис.2.19). Воно може виявитися значно вищим ніж відносний приріст міцності бетону. Для досягнення значного і

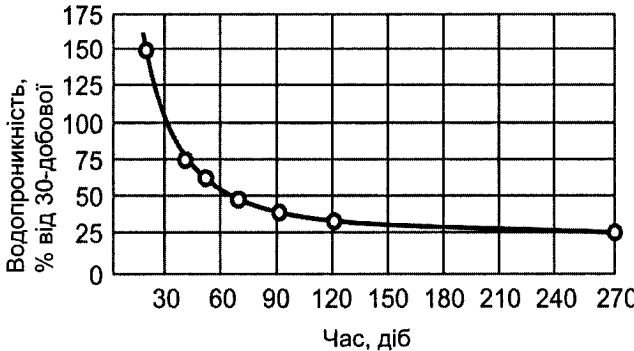


Рис.2.19. Зміна водопроникності бетону залежно від часу тверднення у вологих умовах

стійкого підвищення водонепроникності бетону в часі необхідне забезпечення достатньої вологості бетону при твердненні.

Ефективним способом зниження проникності бетону є введення у бетонну суміш як органічних так і неорганічних добавок.

З органічних добавок застосовують поверхнево-активні речовини ПАР і полімерні добавки. Добавки ПАР використовують для зниження В/Ц, підвищення щільності і зменшення середнього радіуса капілярів. Крім того, більшість ПАР сприяє залученню повітря в бетонну суміш, яке сприяє утворенню умовно-замкнутої капілярно-пориної структури та зниженню проникності. На підвищення водонепроникності позитивно відображається гідрофобізація капілярів, яка досягається при застосуванні гідрофобізуючих ПАР.

Полімерні добавки можуть вводитися в бетонну суміш у вигляді окремих смол, мономерів або сополімерів з каталізаторами, емульсій і латексів. Вони колюматують капілярні пори бетону, утворюючи у бетоні залежно від виду добавки термореактивні і термопластичні полімери, еластомери.

Неорганічні добавки для зниження проникності представлені різними солями, бентонітовими й іншими глинами, активними мінеральними добавками. Ці добавки активно впливають на розвиток питомої поверхні твердої фази цементного каменю і розміри кристалів новоутворень, структуру порового

простору, їх кольматацію в процесі тверднення. Підвищений ефект досягається при введенні різних комбінованих добавок, що включають поряд з неорганічними речовинами добавки ПАР, полімери та ін.

Після виготовлення виробів і конструкцій з бетону зниження його проникності може досягатися обробкою поверхні бетону гідрофобізаторами і речовинами, що хімічно реагують із мінералами цементного каменю з утворенням нерозчинних сполук; кольматацією порового простору; покриттям поверхні бетону захисними матеріалами.

Залежно від умов експлуатації і конструктивних особливостей споруд у проектах гідротехнічних споруд приймають марки бетону за водонепроникністю від W2 до W20. При виборі марки бетону за водонепроникністю враховують показники агресивності водного середовища. Середовище в якому експлуатується бетон із позиції його агресивності прийнято класифікувати на неагресивне (Н), слабке - (Сл), середньо - (Ср) і сильноагресивне (Си) (табл.2.22)

Таблиця 2.22

Ступінь впливу агресивного середовища на бетон протягом 1 року

Показники корозії	Ступінь агресивності середовища			
	Н	Сл	Ср	Си
Зниження міцності,%	немає	менше 5	5...20	більше 20
Зовнішні ознаки	-	Слабке поверхневе руйнування	Пошкодження кутів або волосяні тріщини	Яскраво виражене руйнування (розтріскування)

Для забезпечення необхідної морозостійкості і водонепроникності конструкцій поряд із забезпеченням відповідних складів, при необхідності застосовують гідро- і теплогідроізоляцію зовнішніх поверхонь спорудта інші заходи. Вибір тих або інших проектних рішень виконується на основі техніко-економічного аналізу варіантів.

Глибина руйнування бетону за 50 років експлуатації бетонних конструкцій при неагресивному водному середовищі допускається до 1 см, слабоагресивному - 2...4, середньоагресивному - 4...6, сильноагресивному - більше 6. Для залізобетонних конструкцій допустима глибина руйнування у воді

різного ступеня агресивності відповідно становить 1; 1...2; 2...4 і більше 4 см.

Агресивні властивості води визначає ступінь її мінералізації, жорсткості, а також кислотності чи лужності. Зазвичай вода рік і озер має слаболужну реакцію. Загальний вміст солей у річкових водах, як правило, не перевищує 0,3...0,5 г/л. Грунтові та природні підземні води містять мінеральні солі та інші домішки. Їх агресивність стосовно цементних бетонів оцінюється нормами агресивності водного середовища. Зовсім чиста, не мінералізована вода може бути також агресивною щодо бетону, викликаючи вилуговування гідроксиду кальцію (*корозія I виду*).

Таблиця 2.23

Необхідні марки бетону за водонепроникністю залежно від показників агресивності водного середовища (для споруд у ґрунтах із $K_f > 0,1$ м/доба)

Показник агресивності	Водонепроникність бетону		
	W4	W6	W8
Бікарбонатна лужність, мг-екв/л	вище 0 до 1,05	-	-
Водневий показник, рН	вище 5 до 6,5	вище 4 до 5,0	вище 3,5 до 4,0
Вміст агресивної вуглекислоти, мг/л	вище 10	вище 40	-
Вміст магнезійних солей, мг/л у перерахунку на іон Mg^{2+}	вище 1000	вище 2000	вище 3000
Сумарний вміст хлоридів, сульфатів та ін. солей, мг/л при наявності випаровуючих поверхонь	вище 10000	вище 20000	вище 50000

Примітка. В умовах експлуатації споруд, розташованих у слабофільтруючих ґрунтах із K_f меншим 0,1 м/доба, значення показників агресивності повинні бути помножені на 1,3.

Для запобігання або зменшення інтенсивності корозії I виду дуже велике значення має густина бетону. Другим важливим напрямком підвищення корозійної стійкості бетону є зв'язування $Ca(OH)_2$ активними мінеральними добавками, які вводяться в цемент або безпосередньо в бетонні суміші (рис.2.20).

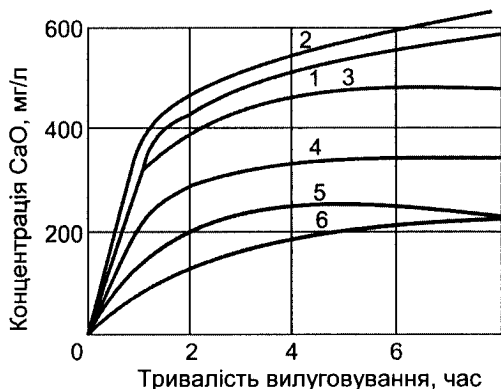


Рис. 2.20. Швидкість вилугування $\text{Ca}(\text{OH})_2$ дистильованою водою із цементного каменю на різних цементах: 1 – піщаний портландцемент; 2 – портландцемент; 3 – гіпсошлаковий цемент; 4 – пуцолановий цемент; 5 – піщано-пуцолановий цемент; 6 – глиноземистий цемент

Корозію бетону викликають кислоти, розчинені у воді (*корозія II виду*) у тому числі надлишковий вміст CO_2 , який може міститися в природній воді (табл.2.23).

Особливість *вуглекислої корозії* полягає в тому, що вона відбувається у два етапи. Спочатку CO_2 , що міститься у воді, утворює CaCO_3 , що ущільнює бетон. Умови

для розчинення карбонатної плівки створюються при збільшенні кількості CO_2 понад рівноважної і утворенні гідрокарбонату. Надлишкова по відношенню до рівноважної кількість CO_2 називається агресивною вуглекислою.

Бетон нормальної щільності починає руйнуватися при $\text{pH} < 6,5$, особливо щільний при $\text{pH} \leq 4,9 \dots 4$.

Корозію II виду викликають також солі магнію, які часто наявні в ґрунтових водах і у значній кількості містяться в морській воді. Морська вода може містити до 35 мг/л солей, з них в середньому NaCl – 78%; MgCl_2 – 11%; MgSO_4 – 4,7%; CaSO_4 – 3,6%; K_2SO_4 – 2,5%. Поряд із розчинними солями, які вимиваються із бетону, при магnezіальній корозії утворюється пухка аморфна маса $\text{Mg}(\text{OH})_2$, що зменшує міцність бетону. У морській воді магnezіальна корозія підсилюється внаслідок підвищення розчинності гідроксиду кальцію і магнію в присутності NaCl .

До 2/3 магnezіальних солей у морській воді становить MgCl_2 , 1/3 – MgSO_4 . Найнебезпечнішою є магnezіально-сульфатна

корозія, оскільки в результаті реакцій MgSO_4 із $\text{Ca}(\text{OH})_2$ а також із гідросилікатами та гідроалюмінатами кальцію утворюється не лише аморфний $\text{Mg}(\text{OH})_2$, але і кристалізується гіпс, об'єм якого більший сумарного об'єму вихідних речовин, що викликає значні напруження в цементному камені. Магнезіально-сульфатну корозію можна вважати змішаною (корозією II та III виду).

Корозія III виду розвивається в бетоні від внутрішніх напружень при накопиченні в порах і капілярах малорозчинних солей. Це може бути як результат кристалізації продуктів хімічних реакцій, так і процесу кристалізації при поглинанні солей із агресивних розчинів.

Найпоширенішою корозією цього виду є *сульфатна корозія*, яка відбувається в цементному камені під впливом аніонів SO_4^{2-} , зв'язаних з катіонами Na^+ , Ca^{2+} і Mg^{2+} . У ґрунтових водах зазвичай вміст SO_4^{2-} не перевищує 60 мг/л, у морській він може досягати 2500...2880 мг/л. Для бетону нормальної щільності на портландцементі сульфати, які містяться у водному середовищі, здійснюють слабкий агресивний вплив при концентрації іонів SO_4^{2-} понад 300 мг/л, а сильний – понад 500 мг/л. Ступінь агресивного впливу води з підвищеним вмістом іонів SO_4^{2-} залежить також від виду цементу (табл.2.24).

Різновидами сульфатної корозії є сульфоалюмінатна та гіпсова корозія. Кристалізація $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ має місце лише при концентрації SO_4^{2-} більше 300 мг/л. У присутності іонів кальцію кристалізація $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ розпочинається при більш низьких концентраціях SO_4^{2-} у розчині.

Відкладення солей у порах цементного каменю можливо і при їх кристалізації із сольових розчинів у результаті капілярного підсмоктування і випаровування води. При підсмоктуванні розчинів 5%-ної концентрації кристалізаційний тиск може досягати при Na_2SO_4 – 4,4; MgSO_4 – 3,6; NaCl – 2,7; CaSO_4 – 0,09 МПа.

Сольова корозія характерна в умовах теплового і сухого клімату при наявності в ґрунті водорозчинних солей у кількості більше 1% або високого рівня ґрунтових вод з мінералізацією не менше 3 г/л.

Ступінь агресивного впливу сульфатів у водному середовищі на бетонні і залізобетонні конструкції

Цемент	SO ₄ ²⁻ у мг/л для споруд, розташованих у ґрунтах із K _ф >0,1 м/добу у відкритій водоймі та для напірних споруд при вмісті іонів HCO ₃ ⁻ , мг-екв/л			Вплив середовища на бетон із маркою W4
	вище 0 до 3	вище 3 до 6	вище 6	
Портланд-цемент	вище 250 до 500	вище 5000 до 1000	вище 1000 до 1200	Слабо-агресивний
	вище 500 до 1000	вище 1000 до 1200	вище 1200 до 1500	Середньо-агресивний
	вище 1000	вище 1200	вище 1500	Сильно-агресивний
Портланд-цемент із вмістом у клінкері C ₃ S не більше 65%, C ₃ A не більше 7%, C ₃ A + C ₄ AF не більше 22% і шлакопортландцемент	вище 1500 до 3000	вище 3000 до 4000	вище 4000 до 5000	Слабо-агресивний
	вище 3000 до 4000	вище 5000	вище 6000	Середньо-агресивний
	вище 4000			Сильно-агресивний
Сульфато-стійкі цементи	вище 3000 до 6000	вище 6000 до 8000	вище 8000 до 12000	Слабо-агресивний
	вище 6000 до 8000	вище 8000 до 12000	вище 12000 до 15000	Середньо-агресивний
	вище 8000	вище 12000	вище 15000	Сильно-агресивний

Примітки: 1. При K_ф<0,1 м/діб значення показників агресивності множаться на 1,3. 2. Для бетону марки W6 значення показників агресивності множаться на 1,3, W8 - на 1,7.

При відповідних температурно-вологісних умовах ряд солей із безводних або маловодних форм (Na₂SO₄, MgSO₄·H₂O) у порах цементного каменю переходять у висоководневі форми кристалогідратів (Na₂SO₄·10H₂O, MgSO₄·7H₂O і т.д.). Такий перехід

супроводжується збільшенням об'єму твердої фази в 1,5...3 рази і значними деформаціями. У результаті сольової корозії в ряді південних регіонів відмічене руйнування конструкцій на висоті 10...50 см від поверхні землі.

Корозія бетону III виду може відбуватися не лише при взаємодії бетону із зовнішнім середовищем, але й у результаті руйнівних процесів, що відбуваються при хімічній взаємодії компонентів бетонної суміші. Характерним прикладом таких процесів є взаємодія лугів, які містяться в цементі, із кремнеземом заповнювачів (*лужна корозія*). У портландцементі вміст розчинних лужних сполук досягає 1...1,5% (у перерахунку на Na_2O). Їх джерелами є глинисті компоненти шихти для отримання клінкеру і зола палива. Значна частина лугів надходить у шихту з пилом печей, що повертається на випал. Луги можуть накопичуватися в бетоні також внаслідок обмінних реакцій складових цементного каменю із солями натрію, розчиненими в природних водах. Реакційноздатними в середовищі лугів є деякі модифікації кремнезему (тридиміт, кристобаліт, кремнеземисте скло, опал, опока, трепел, халцедон та ін.), що зустрічаються у заповнювачах. Продукти реакції між лугами цементу й активним кремнеземом розширюються в об'ємі і створюють руйнуючий тиск. Заповнювач із вмістом розчинного кремнезему більше 50 моль/л вважається потенційно здатним до взаємодії з лугами цементу.

Найбільш дієвим способом попередження даної корозії є обмеження вмісту лугів у цементі до 0,6%. Сповільнюються процеси лужної корозії при введенні в цемент активних мінеральних і деяких інших добавок (вуглекислий літій, альбумін та ін.).

Бетон гідротехнічних споруд може піддаватися корозії при контакті з біологічно-активним середовищем (*біопішкодження*).

Наприклад, мідії, які знаходяться на поверхні підводних морських споруд (до 40 кг на 1 м^2) здатні виділяти до $12,2 \text{ см}^3 \text{ CO}_2$ за 1 год. на 1 кг своєї маси. Ряд інших живих організмів, які знаходяться на поверхні споруд, особливо в період біоценозу (цвітіння води), навпаки, поглинають із бетону вуглекислоту і вільний СаО. В обох випадках розвивається органігенна корозія бетону.

2. Гідротехнічні бетони

Із бактерій, які впливають на цементний камінь, найбільш сильними є динітрифікуючі бактерії, у результаті життєдіяльності яких виділяється сірчана кислота. Анаеробні азотнофіксуючі бактерії утворюють масляну кислоту. Уролітичні бактерії діють в основному на сечу, яка наявна в стічних водах, гідролізуючи її. При цьому виділяються аміак і вуглекислий газ.

У результаті життєдіяльності ряду мікроорганізмів у бетоні розвиваються поряд із хімічними руйнівні електрохімічні процеси, що викликають розкладання продуктів гідратації цементу. Деякі мікроорганізми, особливо гриби, внаслідок збільшення їх об'єму викликають також руйнівні фізико-механічні процеси.

При проектуванні конструкцій, призначених для експлуатації в агресивному середовищі, корозійну стійкість бетону, крім призначення необхідної водонепроникності, забезпечують застосуванням відповідних вихідних матеріалів і добавок, установленням відповідних вимог до категорії тріщиностійкості, ширині розрахункового розкриття тріщин, товщині захисного шару (для залізобетону).

Корозійні процеси, які протікають під впливом зовнішнього агресивного середовища, підсилюються при одночасному впливі фізичних, механічних і хімічних факторів.

Облицювання гідротехнічних споруд (тунелів, водобоїв, водозливів, елементів гребель, морських і річкових берегоукріплюючих споруд та ін.), особливо розташованих на гірських ріках, піддається *механічному зношуванню* наносами, які несуть водні потоки. Зношування викликається зазвичай як стираючим, так і ударним впливом наносів. Зменшення товщини бетону в результаті зношування викликає фільтрацію води, вилугування та розвиток інших видів корозії. Стираючому впливу наносів піддається насамперед цементний камінь як менш стійка складова частина бетону. Найбільшим опором стиранню володіють бетони на алітових цементах зі значною питомою поверхнею, а найменшим – на цементах з підвищеним вмістом беліту. Стійкість бетону до ударних впливів збільшується майже лінійно за інших рівних умов з ростом міцності при стиску. Ударна міцність зносостійких бетонів коливається від 0,08 до 0,17 МПа. Марки бетону за зносостійкістю встановлюються залежно від швидкості руху потоку води, величини середньорічного стоку через

водопрпускну конструкцію і середнього діаметру частинок, що складають насоси.

Зносостійкість зазвичай оцінюється по зменшенню маси зразків у г з площі 1 см^2 у 1 год.

Необхідна зносостійкість бетону забезпечується підбором його складу з урахуванням обмежень за В/Ц і граничній витраті цементу (табл.2.25)

Щебінь і гравій для зносостійкого гідротехнічного бетону повинні мати марки за зношуванням в полочному барабані не нижче:

- Ст-І - для щебеню з вивержених і метаморфічних порід;
- Ст- ІІ - осадових порід, а також гравію і щебеню із гравію.

Таблиця 2.25

Основні параметри зносостійких бетонів різних марок

Клас бетону за міцністю на стиск	Марка бетону за водонепроникністю	Гранична крупність зерен заповнювача, мм	Гранична величина В/Ц	Граничні витрати цементу, кг/м ³
C18/22,5	W8	80	0,48	360
C25/30	W8	80	0,45	400
C32/40	W10	80	0,42	430
C35/45	W10	40	0,40	460
C40/50	W12	40	0,38	480
C50/60	W12	40	0,36	500

Збільшення висоти гребель обумовило підвищення швидкості руху води у водопрпуских трактах гідротехнічних споруд і небезпеку руйнування бетону при кавітаційному впливі. Якщо, наприклад, для греблі Волховської ГЕС максимальна швидкість води, що скидається, не перевищувала 15 м/с, то для греблі Саяно-Шушенської ГЕС вона становить більше 50 м/с.

Сутність *кавітації* полягає у порушенні суцільності всередині текучої рідини й утворенні повітряних бульбашок. Коли ці бульбашки, переміщаючись із потоком, попадають в область із тиском вище критичного, вода розриває їх, що супроводжується гідравлічним ударом. Багаторазово повторювані удари і є причиною кавітаційного руйнування бетону. В результаті кавітації на ряді ГЕС відмічені в конструкціях руйнування бетону глибиною 120...180 см.

2. Гідротехнічні бетони

Інтенсивність кавітаційної корозії значно зростає, коли водний потік насичений частками абразиву.

Одним зі способів захисту бетону від впливу кавітації є надання конструкціям форми, що забезпечує безвідривне обтікання їх потоком. Наприклад, водозливам надається плавний профіль параболічного чи близького до нього виду. Однак, такий спосіб трудомісткий через складність виготовлення і установки спеціальної опалубки, а також дотримання певного гідравлічного режиму.



Рис.2.21. Залежність інтенсивності кавітаційного руйнування цементного бетону від його міцності при стиску 1, 2 і розтягу 1', 2'.

Кавітаційна стійкість бетону оцінюється змінами об'єму (рис.2.21) чи питомими втратами маси матеріалу за одиницю часу. Для оцінки кавітаційної стійкості використовують рівняння виду:

$$\Delta V_k = \frac{a}{f_{cm} - b}, \quad (2.18)$$

де a , b – емпіричні коефіцієнти, на величину яких впливають склад бетону й умови випробування, f_{cm} – міцність бетону.

Види облицовань гідротехнічних споруд

Тип облицовання	Допустимі руйнуючі швидкості, потоку, м/с	Гранично допустиме насичення потоку наносами, %	Допустимі граничні розміри, наносів, мм	Товщина облицовання, см
Сталеві або чавунні плити	Без обмеження			1-2,5
Граніт та інші кам'яні породи	30-50	10-15	До 250	30-50
Кам'яне литво	Без обмеження			-
Сталобетон	15-20	До 5	50-100	10-15
Зносостійкий бетон марки:				
600	12-15	До 3	50-100	40-60
500	10-12	До 3	50-100	40-60
400	6-10	До 3	50-100	40-60
300	4-6	До 3	50-100	40-60
Тверді породи дерева (бук, дуб, клен)	8-10	До 2	50	20-25
Полімербетон на епоксидній смолі	10-15	До 2	50	5-10

Підвищеною кавітаційною стійкістю володіють дрібнозернисті бетони. Зменшують стійкість мікротріщини на поверхні бетону в результаті поперемінного заморожування та відтавання. Важливе значення має забезпечення гладкої поверхні бетону.

При необхідності для підвищення зносо- і кавітаційної стійкості конструкцій застосовують різні види облицовань (табл.2.26). Суттєве підвищення кавітаційної стійкості досягається застосуванням полімербетонів.

Важливе значення для забезпечення довговічності масивних гідротехнічних споруд має їх *термічна тріщиностійкість*.

Тріщиноутворення у масивному бетоні має зазвичай термічний характер. Для оцінки термічної тріщиностійкості бетону використовують критерій K_T :

$$K_{\tau} = \frac{\varepsilon_{\text{гр}} \cdot C \cdot \rho_{\text{б}}}{Q \cdot \alpha}, \quad (2.19)$$

де $\varepsilon_{\text{гр}}$ – гранична розтяжність бетону; C – питома теплоємність, кДж/кг·град; $\rho_{\text{б}}$ – густина бетону, кг/м³; Q – тепловиділення бетону, кДж/м³; α – коефіцієнт лінійного температурного розширення.

Нормоване *тепловиділення* для масивних конструкцій визначається з умови обмеження температури бетону на певний термін тверднення. Допустиме значення тепловиділення в кДж/м³ можна знайти за формулою:

$$Q = \frac{C\rho_{\text{б}}}{K}(t_{\text{кр}} - t_0), \quad (2.20)$$

де $t_{\text{кр}}$ – критичне значення температури бетону, що встановлюється проектом; K – коефіцієнт, рівний або меншої одиниці, що залежить від умов охолодження бетону в конструкції; t_0 – початкова температура бетону при укладанні.

Критична температура бетону в масивних спорудах призначається з урахуванням середньорічної температури (t_p):

$$t_{\text{кр}} = t_p + \Delta t, \quad (2.21)$$

де Δt – допустиме перевищення критичної температури над середньорічною.

Наприклад, при $\Delta t=20^{\circ}\text{C}$, $t_p=5^{\circ}\text{C}$, $C\rho_{\text{б}}=2318$ кДж/м³·град; ($C=0,966$ кДж/м³·град; $\rho_{\text{б}}=2400$ кг/м³); $K=0,8$; $t_0=8^{\circ}\text{C}$ максимально допустиме значення тепловиділення:

$$Q = \frac{2318}{0,8}(25 - 8) = 49257 \text{ кДж/м}^3.$$

Експериментальне визначення тепловиділення бетонів виконується у калориметрах термосного, адіабатичного чи ізотермічного типів. Найбільш широкого поширення набули термосні калориметри, недоліком яких є змінний температурний режим тверднення зразків бетону. Для перерахунку отриманих даних на ізотермічний режим тверднення бетону розроблена відповідна розрахункова методика.

Інтенсивність тепловиділення цементу в бетоні

Строки тверднення, діб	Тепловиділення					
	за даними Вудса, Стейнора, Старка			за даними Кінда, Огорокова, Вольфсон		
	кДж/кг	% до 28 діб.	% до 1 року	кДж/кг	% до 28 діб.	% до 1 року
3	281	78	67	310	77	65
7	319	88	76	361	90	75
28	361	100	86	403	100	84
90	382	109	94	433	107	90
180	412	114	98	458	114	96
360	420	116	100	479	119	100

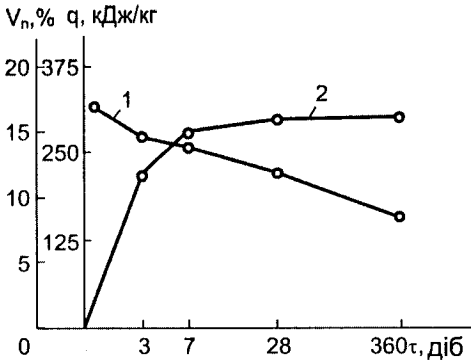


Рис.2.22. Зміна пористості V_p (1) і тепловиділення q (2) бетону в процесі тверднення

Для наближеної розрахункової оцінки тепловиділення бетону застосовують залежності, які враховують питоме тепловиділення цементу, параметри складу бетону, температуру і тривалість тверднення.

Основна частина тепла при твердненні цементу в бетоні виділяється вже в перші 3-7 доби тверднення (табл.2.27) (рис.2.22).

Найбільш зручна для розрахункового визначення тепловиділення бетону залежність, яка враховує питоме тепловиділення цементу.

Запропоновано тепловиділення бетону в віці 7 діб у кДж/м^3 обчислювати за формулою:

$$Q_7 = 0,83q_7(\text{Ц} + 22,3 \text{ ОК}), \quad (2.22)$$

де q_7 – питоме тепловиділення цементу у віці 7 діб, визначене стандартним термосним методом, в кДж/кг ; ОК – осадка конуса бетонної суміші, в см; Ц – витрата цементу в кг/м^3 .

2. Гідротехнічні бетони

Цією формулою рекомендується користуватися в межах наступних значень Ц і ОК:

Ц, кг/м ³	ОК, см
більше 250	2-12
від 200 до 250	2-8
менше 200	2-4

Для інженерних розрахунків при оцінці тепловиділення бетону в різні строки тверднення (Q_τ) може бути використана залежність:

$$Q_\tau = q_\tau \text{Ц}, \quad (2.23)$$

де q_τ – питоме тепловиділення цементу у віці τ діб.

При витраті цементу, наприклад, 300 кг/м³ і осадці конуса 2 см за формулою (2.22) $Q_\tau = 286 q_\tau$, за формулою (2.23) $Q_\tau = 300 q_\tau$, тобто відхилення не перевищує 5%.

Для розрахунку q_τ при використанні портландцементу без мінеральних добавок дійсне адитивне рівняння:

$$q_\tau = a_\tau C_3S + b_\tau C_2S + c_\tau C_3A + d_\tau C_4AF, \quad (2.24)$$

де C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF – розрахунковий вміст відповідних мінералів, %; a_τ , b_τ , c_τ , d_τ – коефіцієнти, що враховують участь мінералів у тепловиділенні цементу у віці τ діб (табл.2.28).

Таблиця 2.28

Коефіцієнти участі клінкерних мінералів
у процесі тепловиділення

Час тверднення, діб	Мінерал			
	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
3	3,902	0,668	6,371	-0,500
7	4,591	0,970	8,690	-1,739
28	4,796	0,643	9,656	0,588
90	4,969	0,970	10,324	1,394
180	5,124	1,869	10,319	1,604
365	5,330	2,234	10,605	1,68

Використання рівняння (2.24) при прогнозуванні тепловиділення реальних цементів на практиці зустрічається рідко. Це обумовлено тим, що бездобавочні цементы використовуються для гідротехнічних бетонів у обмеженій кількості, однак і для них крім мінералогічного складу (рис.2.23), на тепловиділення суттєво впливають тонкість помелу, наявність добавок та ін.

Для зведення бетонних гребель великих гідровузлів та інших масивних гідротехнічних споруд за спеціальними технічними умовами виготовляють низько- і помірнотермічні цементи.

До *низькотермічних* відносять цементи з величиною тепловиділення у 3-добовому віці не більше 230 кДж/кг а у 7-добовому – не більше 270 кДж/кг при випробуванні термосним методом. *Помірнотермічними* вважають цементи з величиною тепловиділення у 7-добовому віці не більше 315 кДж/кг.

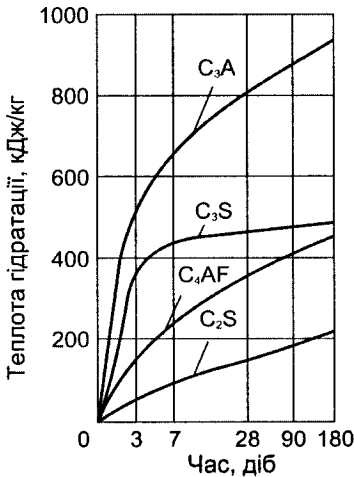


Рис.2.23. Тепловиділення при гідратації клінкерних мінералів

Вперше низькотермічний цемент був використаний при будівництві греблі Морріс на р. Сан-Габріель (США) у 1932 р. Згодом у США було стандартизовано п'ять типів портландцементу. Цементи типів II і IV відносяться відповідно до помірнотермічного і низькотермічного портландцементів. У цементі II-го типу вміст C₃S нормується не більше 50%, C₃A – 8%, IV-го типу – C₃S – не більше 35%, C₂S не менше 40% та C₃A – не більше 7%.

Тепловиділення типових американських цементів наведено в табл.2.29.

Таблиця 2.29

Тепловиділення типових американських цементів

Тип і найменування портландцементу	Середня теплота гідратації при 21°C в кДж/кг у віці					
	3 доби	7 діб	28 діб	3 міс	1 рік	6,5 років
Швидкотверднучий (тип III)	315	386,4	424,2	449,4	474,6	508,2
Звичайний (тип I)	256,2	336	403,2	436,8	457,8	491,4
Помірнотермічний (тип II)	197,4	256,2	336	369,6	399	411,6
Низькотермічний (тип IV)	172,2	210	277,2	315	340,2	357

2. Гідротехнічні бетони

У СРСР перші технічні умови на цемент для гідротехнічного будівництва були розроблені в 1941р для Верхньосвірської ГЕС. Потім вони розроблялися для більшості споруд великих ГЕС. Наприклад, для будівництва Красноярської ГЕС використовувався портландцемент із вмістом C_3S 45...50%, C_3A не більше 7% без мінеральних добавок. Для бетону до якого не пред'являлися підвищені вимоги за морозостійкістю використовувався також шлакопортландцемент із вмістом доменного гранульованого шлаку не більше 40%. Технічні умови для ряду інших ГЕС у зонах гребель, де не пред'являлися вимоги за морозостійкістю, допускали застосування пуцоланових цементів.

Дослідженнями ВНДІГ ім Б.Є. Веденєєва для гідротехнічного бетону було рекомендовано два типи портландцементу; що мають наступний середній мінералогічний склад у %:

	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF	CaO не більше	MgO не більше
Г-1	45	30	6	14	0,5	4
Г-2	54	25	9	9	0,5	4

Портландцемент типу Г-1 рекомендований для морозостійкого бетону зовнішніх зон гідроспоруд із введенням повітрявтягувальних добавок. Клінкер такого складу також може застосовуватися при виготовленні змішаних цементів для внутрішніх і зовнішніх підводних зон масивних споруд.

Портландцемент типу Г-2 використовується в основному для тонкостінних збірних і попередньо напружених гідротехнічних конструкцій із введенням необхідних добавок ПАР.

За величиною тепловиділення до портландцементів із помірною і низкою екзотермією близькі сульфатостійкі цементи.

Поряд із застосуванням спеціальних цементів зі зниженою екзотермією, а також бетонів з відносно низькою витратою цементу зменшення екзотермії бетону досягається зниженням температури бетонних сумішей шляхом попереднього охолодження води замішування і заповнювачів, заміни частини води замішування льодом, запобіганню нагріванню бетонних сумішей при їх транспортуванні, подачі та укладанні.

Для охолодження бетону в практиці гідробудівництва успішно застосовується метод трубного охолодження бетонних масивів, суть якого полягає в пропусканні холодної води по трубах покладеним у блоках.

2.3. Гідротехнічний бетон для тонкостінних конструкцій та споруд

Тонкостінні конструкції із застосуванням гідротехнічного бетону широко застосовують у водогосподарському та транспортному будівництві, берегоукріплюючих роботах, суднобудуванні та ін.

Товщина тонкостінних конструкцій, наприклад, залізобетонних плит для облицювання зрошувальних каналів знаходиться в межах 8...20 см.

Гідротехнічний бетон у тонкостінних конструкціях не вимагає температурного регулювання для забезпечення тріщиностійкості, однак піддається впливу великої кількості експлуатаційних факторів, які можуть бути ще більш жорсткішими, ніж у масивних спорудах. Наприклад, бетонне облицювання каналів зрошувальних систем може одночасно піддаватись дії близько 30 видів навантажень і можливих їх комбінацій: гідростатичному і гідродинамічному тиску, поперемінному водонасиченню і висушуванню, заморожуванню і відтаванню, нагріванню та охолодженню, руйнуючої дії потоку води і наносів, рухомого льоду, напруженням і деформації в результаті усадки і осідання споруд, просадки ґрунту та ін.). У не менш жорстких умовах перебувають залізобетонні конструкції транспортних споруд (дія постійних, статично і динамічно змінних навантажень, кліматичних і різних факторів та ін. Врахувати усі навантаження і впливи при виборі якісних параметрів бетону тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд досить складно.

Тонкостінні конструкції зазвичай зазнають дію різноманітних впливів у значно більш ранньому віці, ніж масивні, Класи бетону за міцнісними показниками для тонкостінних залізобетонних конструкцій призначають, як правило, у віці 28 діб

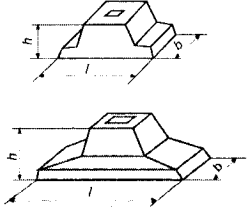
2. Гідротехнічні бетони

після їхнього розрахунку на міцність і тріщиностійкість із врахуванням вимог за морозостійкістю, водонепроникністю та інших експлуатаційних впливів. Класи бетону для тонкостінних конструкцій відповідають значенням гарантованої міцності бетону, МПа, із забезпеченістю 0,95, в той час, як для масивних споруд допускається застосування бетону із забезпеченістю гарантованої міцності 0,9.

Для зведення гідротехнічних споруд із застосуванням тонкостінних конструкцій поширене використання збірних залізобетонних елементів заводського виготовлення. Схеми деяких таких елементів для конструкцій водогосподарського призначення, наведені в табл.2.30.

Таблиця 2.30
Приклади збірних залізобетонних елементів
для водогосподарського будівництва

Найменування конструкцій	Ескіз
Труби розтрубні безнапірні, виготовлені віброштамуванням або центрифугуванням	
Труби безнапірні прямокутні	
Лотки параболічні	
Сійки опор для лотків	

Найменування конструкцій	Ескіз
Фундаменти опор для лотків	
Блоки колодязів	
Плити кріплення споруд ребристі	
Оголовки чекових споруд	
Плити кріплення укосів земляних гребель	

Для більшості збірних елементів, призначених для водогосподарського будівництва, у проектах передбачений бетон з проектної міцністю на стиск 20...35 МПа за марками

2. Гідротехнічні бетони

морозостійкістю і водонепроникністю не менше F150 та W6 відповідно.

Для збірних залізобетонних елементів відпускну міцність бетону приймають не менше 70% міцності для заданого класу бетону. При цьому для деяких конструкцій таких як палі, шпунти, конструкції мостів та ін. при відповідному обґрунтуванні допускається значення нормованої відпускну міцності 100% від проектної міцності бетону. Для залізобетонних лотків зрошувальних систем, плит облицювання зрошувальних каналів у холодний період року нормована відпускну міцність бетону повинна бути не менше 80% від проектної, для труб, елементів підземних каналів і колекторів – не менше 90%. У холодний період року включають період, який починається на один місяць раніше місяця із середньою температурою повітря 0°C і нижче. У районах із середньомісячною температурою повітря найбільш теплого місяця нижче плюс 10°C за холодний період допускається приймати весь рік.

Для попередньо напружених залізобетонних елементів, які розраховуються на вплив багаторазово повторюваного навантаження, і стрижневих конструкцій застосовують бетон класу не нижче C15/20. При застосуванні в попередньо напружених конструкціях високоміцного арматурного дроту використовується бетон із класом за міцністю не нижче C16/20, для елементів, які занурюють у ґрунт забиванням або вібруванням, бетон класу не менше C25/30.

Таблиця 2.31

Характеристика бетону залежно від товщини облицювання зрошувальних каналів і величини згинального моменту

Згинальний момент, Н. м	Товщина облицювання, м	Рекомендовані класи бетону за міцністю на стиск
1400	0,08	C8/10
2200	0,1	C12/15
3700	0,12	C16/20
5000	0,14	C16/20
7500	0,16	C20/25
9500	0,18	C20/25
12000	0,20	C25/30

У тих випадках коли експлуатаційні якості конструкцій визначаються роботою розтягнутого бетону, в проектах нормуються поряд із класами бетону за міцністю на стиск міцність на осьовий розтяг і розтяг при згині.

Із можливими напруженнями та міцнісними характеристиками бетону пов'язані розміри перетину конструкцій. Наприклад, при призначенні товщини облицювання зрошувальних каналів необхідно враховувати виникаючий у ньому згинальний момент від власної маси бетону і маси води в каналі (табл.2.31).

Для каналів із пропускною здатністю до 5 м³/с рекомендується бетонне облицювання із проектною міцністю 20 МПа, 5...100 м³/с – 25 МПа, 100...1000 м³/с – 30...40 МПа.

Поряд із міцнісними показниками бетону для залізобетонних конструкцій, які експлуатуються під впливом води, важливе значення має встановлення *категорії тріщиностійкості та граничної ширини розкриття тріщин* (табл.2.32).

Категорія вимог до конструкцій за тріщиностійкістю, а також гранично допустима ширина розкриття тріщин, товщина захисного шару і марка бетону за водонепроникністю встановлюються із урахуванням класу застосовуваної сталі залежно від ступеня агресивного впливу середовища (табл.2.32, 2.33).

Таблиця 2.32

Вимоги до залізобетонних конструкцій за тріщиностійкістю

Ступінь агресивного впливу водного середовища	Категорія вимог за тріщиностійкістю і гранично допустима ширина розкриття тріщин, мм, залежно від класу арматурної сталі		
	I	II	III
Слабоагресивний	$\frac{3}{0,2}$	$\frac{3}{0,15}$	$\frac{2}{0,1}$
Середньоагресивний	$\frac{3}{0,15}$	$\frac{3}{0,1}$	$\frac{1}{-}$
Сильноагресивний	$\frac{3}{0,15}$	$\frac{2}{0,05}$	не допускаються до застосування

Примітка. Над ризикою категорія вимог до тріщиностійкості, під ризикою - допустима ширина розкриття тріщин.

Гранична ширина розкриття тріщин призначається також залежно від характеристики конструкцій і умов їх роботи. Її найменше допустиме значення (0,05 мм) можливо для конструкцій,

2. Гідротехнічні бетони

які перебувають у зоні змінного рівня морської води, а також конструкцій, що піддаються періодичному заморожуванню і відтаванню при числі циклів у рік 50 та більше. Якщо для безнапірних конструкцій (конструкцій із градієнтом напору не більше 1), які перебувають постійно під водою, гранична ширина розкриття тріщин допускається до 0,3 мм, то для напірних розтягнутих конструкцій вона приймається залежно від величини напірного градієнта в межах 0,1...0,15 мм.

Таблиця 2.33

Товщина захисного шару в залізобетонних конструкціях і марка бетону за водонепроникністю залежно від ступеня агресивного впливу середовища.

Ступінь агресивного впливу водного середовища	Товщина захисного шару, не менше, мм	Марки бетону за водонепроникністю залежно від класу арматурної сталі		
		I	II	III
Слабоагресивний	20	W4	W6	W6
Середньоагресивний	30	W6	W6	W6
Сильноагресивний	30	W6	W6	-

Для тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд призначення *марки бетону за водонепроникністю* залежно від величини напірного градієнта є не завжди достатньо обґрунтованим. Наприклад, при товщині бетонного облицювання 0,08 м навіть для каналів із глибиною води 1 м, враховуючи високий напірний градієнт (більше 12), необхідний бетон марки W12. Аналіз великої кількості проектів зрошувальних каналів з бетонним облицюванням показав, що найчастіше застосовують марки бетону за водонепроникністю W4...W6. Призначення надмірно високих марок бетону облицювань за водонепроникністю часто призводить до необхідності суттєвої перевитрати цементу. При цьому не зникають основні втрати води в результаті фільтрації, враховуючи те, що через бетон облицювання фільтрується не більше 15...20% загального об'єму втрат води. Основні втрати води в каналах відбуваються через її фільтрацію крізь шви і тріщини в бетоні.

Більш точною фільтраційною характеристикою бетону в порівнянні з його маркою за водонепроникністю є коефіцієнт фільтрації (K_{ϕ}). Одній і тій же марці бетону за водонепроникністю

відповідає досить велика область значень коефіцієнта фільтрації (табл.2.21). Нами виконані розрахунки, які дали можливість отримати номограму (рис.2.24), яка пов'язує напір води, втрати води з каналу, товщину облицювання з коефіцієнтом фільтрації. Наприклад, для облицювання каналу товщиною 0,1 м при напорі 2 м і фільтраційних втратах $0,003\text{л}/(\text{дїб м}^2)$ необхідний бетон з коефіцієнтом фільтрації $K_f=2,5 \cdot 10^{-10}$ см/с. Такому коефіцієнту фільтрації відповідає бетон з маркою за водонепроникністю W6 у віці 28 дїб (табл.2.21). Розрахунки, виконані за цією методикою, показали, що для облицювань каналів глибиною 3...7 м необхідно застосовувати бетон марок W4...W6, при більшій глибині – W8...W12. Марка бетону за водонепроникністю призначається також з урахуванням агресивності водного середовища, а для залізобетонних виробів з урахуванням класу арматурної сталі (табл. 2.33).

Однієї з головних причин руйнування конструкцій із застосуванням гідротехнічного бетону є можливий циклічний вплив заморожування та відтавання. Рекомендована методика визначення *марки бетону за морозостійкістю*, як зазначено раніше, є недосконалою і повинна коректуватися з урахуванням результатів експлуатації реальних споруд у конкретних умовах. Це особливо важливо для споруд із застосуванням тонкостінних конструкцій. Наприклад, досвід експлуатації збірних і монолітних облицювань каналів із маркою бетону за морозостійкістю F50 у регіонах з відповідним числом циклів заморожування і відтавання показав, що багато які з них зруйнувалися вже через 2...7 років. Збірні залізобетонні лотки довжиною 8 м, установлені на опорах, також при проектній і фактичній марці за морозостійкістю бетону F50 зруйнувалися через 2...3 роки експлуатації в Криму, на Північному Кавказі та інших регіонах з помірним кліматом. Дослідження показали, що для нормативного строку експлуатації лотків 30 років необхідно було забезпечити морозостійкість бетону не менше F300.

На відміну від масивних споруд тонкостінні бетонні конструкції зазвичай повністю насичуються водою і мають незначну теплову інерцію. Роботу таких конструкцій в значній мірі визначають розтягувальні напруження, які сприяють значному зниженню морозостійкості.

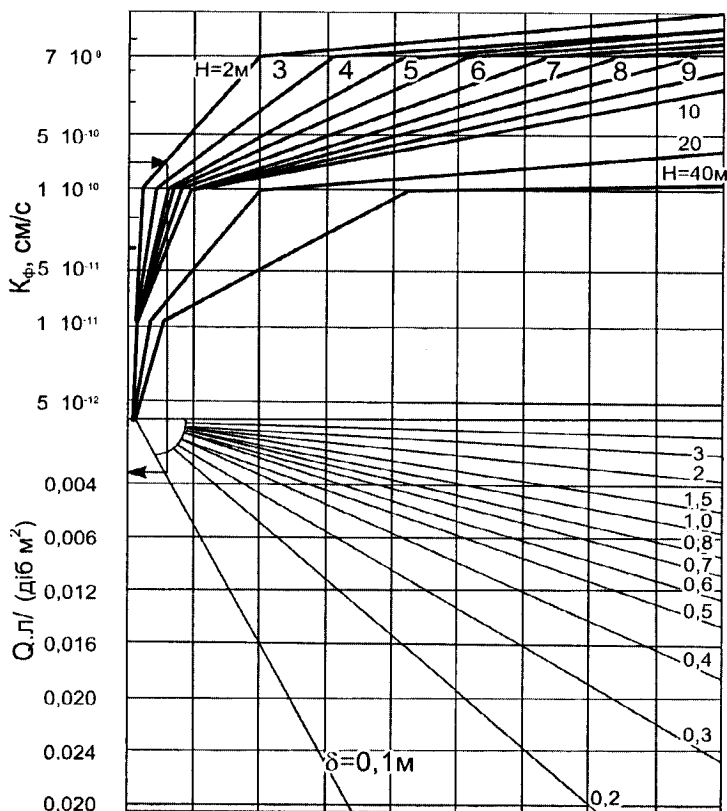


Рис.2.24. Номограма для розрахунку коефіцієнта фільтрації (K_f) бетонних облицювань.

Вище осі абсцис – криві напорів H , нижче - товщина облицювань (δ); Q – фільтраційна витрата води через бетон облицювань

У загальному виді марку бетону за морозостійкістю запропоновано визначати за формулою:

$$F = K_1 \frac{Tn}{K_2}, \quad (2.25)$$

де T – нормативний термін експлуатації, роки; n – кількість циклів переходу температури через нуль градусів у районі експлуатації;

K_1 – коефіцієнт, що враховує співвідношення ступеня впливу на бетон (рівень ушкоджень) в умовах стандартного циклу випробувань і в умовах експлуатації конструкцій ($K \approx 0,1 \dots 1,0$); K_2 – коефіцієнт, що враховує вплив “самозаліковування” структури бетону в процесі експлуатації.

Різні методи прогнозування морозостійкості основані на залежності її від параметрів, що характеризують структуру бетону, ступінь деструктивних змін при циклічному заморозуванні, а також рівняннях регресії, які пов’язують морозостійкість із іншими властивостями і складом бетонної суміші.

Існують кореляційні залежності між морозостійкістю і вмістом льоду в бетоні. Наприклад, запропонований критерій морозостійкості (КМ), лінійно пов’язаний із критичним числом циклів:

$$KM = \frac{\Pi_0 - \Pi_p + I_t}{I_{-10}}, \quad (2.26)$$

де відкрита пористість $\Pi_0 = \Pi_{zn} - \Pi_p$ (Π_{zn} - загальна пористість; Π_p - умовно-замкнута (резервна) пористість); I_t та I_{-10} – об’ємний вміст льоду при температурі заморозування зразків t^0C та при -10^0C .

Емпіричне рівняння, яке пов’язує величину F і KM , має вид:

$$F = 2,04KM - 25, \quad (2.27)$$

Запропонований також інший параметр морозостійкості (C), пов’язаний із вмістом льоду в бетоні I_{-10} :

$$C = I_{-10} (B/\zeta)^{1/3}. \quad (2.28)$$

Залежність морозостійкості бетону F від параметра C запропонована у вигляді рівняння:

$$F - F_0 = I / (C - C_0), \quad (2.29)$$

де F_0 і C_0 – деякі граничні значення параметрів F і C .

Основні властивості гідротехнічного бетону – міцність, морозостійкість і водонепроникність взаємозалежні. В табл.2.34 для прикладу наведені значення зазначених властивостей отриманих нами при випробуванні бетону нормального тверднення у віці 28 діб з використанням середньоалюмінатного ($C_3A = 6 \dots 8\%$) портландцементу М500, що містив 20% доменного гранульованого шлаку, гранітного щебеню 5...20 мм і середньозернистого

2. Гідротехнічні бетони

кварцового піску. Пластифікатори та повітровтягувальні добавки не використовували.

Неврахування можливого співвідношення властивостей бетону при заданому складі і технологічних режимах призводить до перевитрати необхідної кількості цементу і неоптимальності прийнятих конструктивних рішень. Регулювання співвідношення властивостей у необхідному напрямку досягається правильним вибором виду вихідних матеріалів і введенням у бетонні суміші різних добавок (пластифікуючих, повітровтягувальних, кольматуючих та ін.)

Таблиця 2.34

Співвідношення проектних властивостей бетону у віці 28 днів

Осадка конуса, см	Клас бетону за міцністю на стиск, (C)	Марки бетону	
		за морозостійкістю, (F)	за водонепроникністю, (W)
2...12	C12/15	50...75	2
2...4	C20/25	100...150	2...4
10...12	C20/25/25	75...100	2...4
2...4	C25/30	200...250	6...8
10...12	C25/30	100...150	6...8
2...4	C30/37	250...300	10...12
10...12	C30/37	200...250	10...12

Бетони з морозостійкістю F100 і вище для гідротехнічних споруд доцільно виготовляти з обов'язковим застосуванням повітровтягувальних або газоутворювальних добавок.

Бетонні суміші марок за легкоукладальністю P3...P5 для виробництва збірних залізобетонних конструкцій і виробів, і марок за легкоукладальністю P4 і P5 для монолітних і збірно-монолітних конструкцій повинні приготуватися з обов'язковим застосуванням пластифікуючих добавок.

Вимоги до речовинного і хіміко-мінералогічного складу цементів і його властивостей призначаються з урахуванням технологічних особливостей виготовлення конструкцій і умов їх експлуатації. При нормуванні морозостійкості і підвищеної агресивності середовища доцільне застосування низькоалюмінатних

портландцементів, які не містять мінеральних добавок або містять до 15...20% доменного гранульованого шлаку. Ефективне застосування сульфатостійких, пластифікованих і гідрофобних цементів.

Для тонкостінних конструкцій поширене застосування дрібнозернистих бетонів.

У дрібнозернистих бетонах максимальну крупність заповнювача обмежують 10 мм. Розповсюдженим різновидом цього виду бетону є *піщаний бетон*, який не містить крупний заповнювач. Дрібнозернисті бетони характеризуються підвищеною витратою цементу. Суттєве зниження витрати цементу досягається при введенні ефективних пластифікуючих добавок і особливо суперпластифікаторів.

Введення суперпластифікаторів дає можливість суттєво знизити В/Ц без зміни рухомості, що призводить відповідно до збільшення класу дрібнозернистих бетонів за міцністю. Найбільший пластифікуючий ефект досягається в “жирних” сумішах на крупних пісках, хоча і при застосуванні дрібних і дуже дрібних пісків він може бути досить значний. Застосування суперпластифікаторів дає можливість отримувати високоміцні дрібнозернисті бетони.

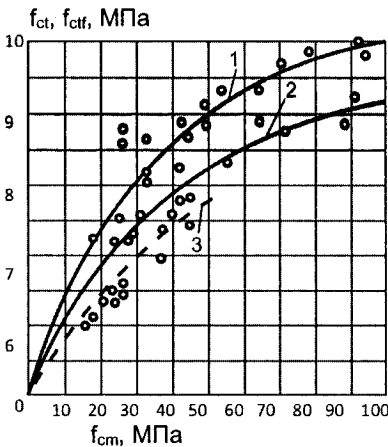


Рис.2.25. Залежність міцності бетону при згині (f_{ct}) і розтягу (f_{ctf}) від міцності при стиску (f_{cm}):
 1 – f_{ctf} піщаного бетону;
 2 – f_{ctf} звичайного бетону;
 3 – R_{ct} піщаного бетону

2. Гідротехнічні бетони

Для дрібнозернистих бетонів характерне підвищене відношення міцності на розтяг і згин до міцності на стиск (рис.2.25). При рівній міцності на стиск міцність при згині для дрібнозернистих бетонів на 10...15% вища, ніж у звичайних.

Для виробництва збірних конструкцій, які піддаються тепловій обробці застосовують цементи 1 та 2-ої групи ефективності при пропарюванні (табл.2.35).

У НДІЗалізобетону встановлена залежність міцності цементних розчинів і бетонів на цементах різного мінералогічного складу від часу теплової обробки (τ) у год. при температурі ізотермічної витримки 80°C. Теплової обробці піддавалися зразки за режимом 3+n+2 год із попередньою витримкою 2 год, випробовували їх через 6 год. після вивантаження з камери. Встановлена залежність виражається формулою:

$$f_{cm} = A(\lg \tau - \lg \tau_0), \quad (2.30)$$

де A – параметр, що характеризує особливості даного цементу при пропарюванні й умови випробування МПа; τ – час теплової обробки в год, що включає період ізотермічної витримки n і частину періодів розігріву й охолодження, протягом яких температура зразків перевищує 60°C, у середньому $\tau=n+3$; τ_0 – індукційний період тверднення, тобто період початку утворення міцної структури.

Таблиця 2.35

Групи цементів за ефективністю пропарювання

Групи за ефективністю пропарювання	Вид цементу	Границя міцності при стиску при пропарюванні для марок цементу, МПа			
		300	400	500	550-600
1	ПЦ	Більше 23	Більше 27	Більше 32	Більше 38
	ШПЦ	21	25	30	-
2	ПЦ	Від 20 до 23	Від 24 до 27	Від 28 до 32	Від 33 до 38
	ШПЦ	Від 18 до 21	Від 22 до 25	Від 26 до 30	-

Примітка. Загальна тривалість пропарювання 12...13 год. при температурі 80°C.

Як видно з табл.2.35, при рівній кількості C_3A міцнісна характеристика цементів, які застосовуються в умовах пропарювання, підвищується зі збільшенням вмісту C_3S у клінкері. При рівній кількості аліту вона росте при зниженому вмісту C_3A , чим більше C_3A , тим коротший індукційний період. Максимальну швидкість тверднення і набір міцності в пропарювальних бетонах, мають цементи I групи, мінімальну III групи.

Параметри рівняння (2.30) для цементів різного мінералогічного складу наведені в табл.2.36.

Таблиця 2.36

Параметри рівняння (2.30)

Група цементів	Номер цементів	Мінералогічна характеристика цементу	A, МПа	τ_0 , год	Границя лінійності функції в год
I - низько- алюмінатні	1	$C_3A=2...3\%$; $C_3S=60\%$	12,5	0,6	20...25
	2	$C_3A=2...3\%$; $C_3S=50\%$	9,5	0,45	20
II - середньо- алюмінатні	3	$C_3A=8\%$; $C_3S=60...65\%$	10,0	0,15	9...10
	4	$C_3A=8\%$; $C_3S=50\%$	9,5	0,2	9...10
III - високо- алюмінатні	5	$C_3A=11...12\%$; $C_3S=55\%$	8,5	0,15	9
	6	$C_3A=11...12\%$; $C_3S=40...50\%$	7,0	0,18	7...8

Оптимальна тривалість ізотермічної витримки бетону при 80...90°C на цементах всіх груп, при перевищенні якої приріст міцності стає мінімальним, становить 4...12 год.

Нижче наведені рекомендовані оптимальні режими теплової обробки бетонів (підйом температури – ізотермічна витримка, охолодження в год.) на цементах різних мінералогічних груп:

I група -	3+12+2
II група-	3+6+2
III група-	3+4+2
Рядові шлако- портландцементи	3+14+2
Швидкотверднучі шлакопортланд- цементи	3+8+2

2. Гідротехнічні бетони

Більшість цементів (крім цементів III групи) при пропарюванні за оптимальними режимами забезпечують досить інтенсивне наростання міцності до 28 доби.

Поряд із вимогами до цементу в технічних умовах, які регламентують отримання конкретних конструкцій, можуть встановлюватися і специфічні вимоги до заповнювачів. Наприклад, для виготовлення бетонних і залізобетонних труб застосовують крупні заповнювачі з вмістом пилоподібних і глинистих частинок не більше 1%, зерен пластинчастої (лещадної) і голчастої форми не більше 25%. Щебінь із природного каменю для бетону напірних і низьконапірних труб застосовують марки не нижче 1000, а щебінь із гравію марки за дробимістю не нижче 1000. Для бетону безнапірних труб щебінь із вивержених порід повинен мати марку не нижче 800, з осадових і метаморфічних – не нижче 600, щебінь із гравію марку за дробимістю – не нижче 800. У піску вміст пилоподібних і глинистих частинок допускається не більше 2% для бетону напірних труб і 3% – безнапірних і низьконапірних труб.

Потужним засобом для керування властивостями гідротехнічного бетону, як для масивних, так і для тонкостінних конструкцій різного призначення є хімічні добавки - модифікатори.

У гідротехнічному будівництві є позитивний досвід застосування *легких бетонів* із використанням пористих заповнювачів. У Вірменії з легких бетонів на основі литоїдної пемзи та вулканічного шлаку, починаючи з 1949 р., зведено конструкції акведуків, облицювання тунелів, каналів багатьох гідротехнічних споруд. Характерною рисою легких бетонів (особливо на пористих пісках) є підвищена міцність при розтягу.

Цьому сприяє розвинена поверхня заповнювачів, яка викликає хороше зчеплення з цементним каменем. Відношення міцності на розтяг до міцності на стиск для важких бетонів становить 0,05...0,1, для легких – 0,06...0,17. Гранична розтяжність легких бетонів залежно від особливостей заповнювачів коливається у діапазоні 0,03...0,4 мм/м і може в 4...5 рази перевищувати значення цієї характеристики для важких бетонів.

Загальна усадка легких бетонів на 15...30 % вища усадки важких бетонів. Усадочні деформації знижуються при застосуванні якісних заповнювачів, зменшенні витрати цементу та водовмісту.

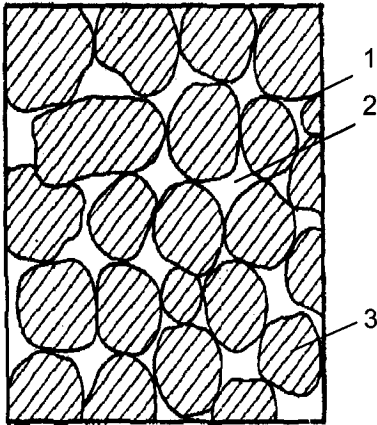


Рис.2.26. Схема структури крупнопористого бетону
1 – прошарок цементного тіста;
2 – поровий простір;
3 – заповнювач

При введенні повітровтягувальних добавок морозостійкість легких бетонів можна довести до F300 і більше. Водонепроникність легких бетонів зазвичай не нижча, а для ряду складів може бути вищою, ніж важких.

Для виконання облицювань осушувальних каналів, дренажів і фільтрів застосовують різновид легкого бетону – *крупнопористий бетон* – бетон, який отримують при відсутності в складі бетонної суміші піску й обмеженій витраті цементу, достатнього лише для склеювання зерен крупного заповнювача (рис. 2.26).

Для отримання крупнопористого бетону застосовують як легкі пористі заповнювачі, так і звичайні важкі гравій або щебінь.

Середня густина крупнопористого бетону може змінюватися від 400 до 2000 кг/м³, його міцність, в основному, залежить як від кількості, так і міцності цементного каменю, що його складає. Остання визначається в основному активністю цементу і водоцементним відношенням (рис.2.27)

Міцність крупнопористого бетону при стиску зазвичай становить 5...15 Па, при більшій ніж у відповідних щільних бетонів міцності на розтяг.

Для бетону даного виду характерна незначна усадка, враховуючи відносно невисокий вміст цементного каменю.

Регулюючи крупність і зерновий склад заповнювача, коефіцієнт фільтрації можна змінювати в межах 0,2...0,25 см/с. Морозостійкість крупнопористих бетонів при використанні різних заповнювачів становить 50...100 циклів.

Для тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд із підвищеними вимогами до фізико-механічних характеристик ефективно застосування бетонополімерів, полімерцементних і полімерних бетонів, фібробетонів.

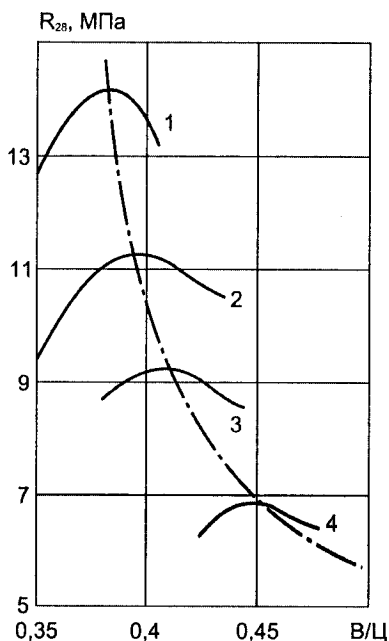


Рис.2.27. Залежність міцності крупнопористого бетону від водоцементного відношення:

1– склад бетону (цемент: гравій за об'ємом) 1:6; 2– те ж саме, 1:7; 3– те ж саме, 1:8; 4– те ж саме 1:10

До бетонополімерів відносять бетони, просочені полімерними речовинами або мономерами з подальшою їх полімеризацією. Бетонополімери входять у групу "П-бетонів", що об'єднують різні різновиди бетонів, у яких використовуються полімери, як в якості добавки, так і основних компонентів.

Бетонополімери поділяють залежно від виду матеріалу, що просочує: мономерів (стиролу, метилметакрилату та ін.), в'язких органічних матеріалів (бітумів, парафіну та ін.), полімерних речовин.

До бетонополімерів за технологією і рядом властивостей близькі бетони, просочені сіркою і рідким склом.

Бетонополімери отримують шляхом просочення попередньо висушеного бетону. Найпоширеніший конвективний спосіб сушіння бетону в струмині нагрітого повітря, при якому волога випаровується в результаті

різниці парціальних тисків водяної пари на поверхні бетону й у середовищі теплоносія. Такий спосіб сушіння може викликати напруження, пов'язані зі температурними та вологісними градієнтами, появу тріщин. Можливе застосування радіаційного контактного і височастотного сушіння бетону.

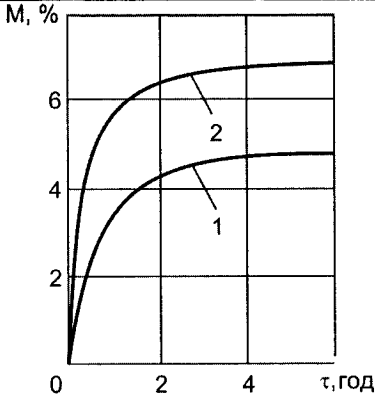


Рис.2.28. Кінетика просочення бетону мономером (М):

1 – капілярне просочення при нормальному тиску; 2 – просочення з вакуумуванням

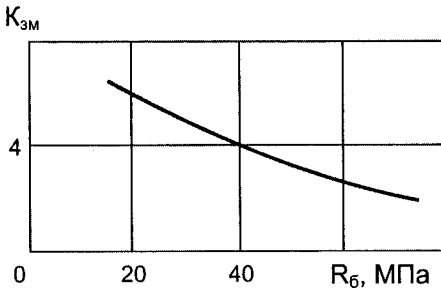


Рис.2.29. Вплив міцності бетону на коефіцієнт зміцнення бетонополімеру (К_{зм})

більш низької міцності характеризуються більш високим коефіцієнтом зміцнення (К_{зм}).

Пористість щільного бетону коливається в межах 6–20%, об'єм пор діаметром більше 1 мкм може досягати 2...3%. Зниження пористості бетону на 10% підвищує його міцність приблизно в 2 рази.

Для більш повного видалення вологи з попередньо висушених виробів їх піддають вакуумуванню у 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 вакуумуванні, підвищеному або нормальному тиску (рис.2.28). В останньому випадку необхідна тривалість просочення триває кілька годин, у той час як надлишковий тиск 0,1...1 МПа дає можливість скоротити її до 1...2 год.

При просоченні бетону змінюється його структура, у першу чергу суттєво зменшується відкрита капілярна пористість, ущільнюється контактна зона цементного каменю із заповнювачами. В результаті зменшується водопоглинання і суттєво зростає міцність, покращуються інші фізико-механічні властивості (рис.2.29). При цьому, бетони

2. Гідротехнічні бетони

Особливості пористої структури матеріалу обумовлюють вибір просочуючих складів і режимів обробки. Менш в'язкі склади можуть проникнути в більш тонкі пори і капіляри, однак з їх допомогою важко забезпечити омоноличування крупних пор і дефектів.

Таблиця 2.37

Властивості бетону і бетонополімеру

Показник	Вихідний бетон	Бетонополімер
Границя міцності, МПа: при стиску	30...50	100... 200
розтягу	2...3	6...19
згині	5...6	14...28
Модуль пружності при стиску, МПа	$2,5 \cdot 10^4 \dots 3,5 \cdot 10^4$	$3,5 \cdot 10^4 \dots 5 \cdot 10^4$
Гранична деформація при стиску	0,001	0,002
Міцність зчеплення з арматурою, МПа	1...2	10...18
Динамічна міцність при розтягу ($\tau=10^3$ МПа·с)	7	30
Деформація усадки	$50 \cdot 10^{-5}$	$0 \dots 5 \cdot 10^{-5}$
Деформація повзучості	$(40 \dots 60) \cdot 10^{-5}$	$(6 \dots 8) \cdot 10^{-5}$
Електричний опір, Ом	10^5	10^{14}
Водопоглинання, %	3...5	1
Морозостійкість, цикли	200	5000
Корозійна стійкість до сульфатів і кислот	Недостатня	Висока

У табл.2.37, 2.38 наведено порівняння властивостей вихідного бетону і бетону при просоченні метилметакрилатом із подальшою полімеризацією (за даними Ю.М. Баженова).

Повзучість і усадка бетонополімеру в декілька разів менша ніж вихідного бетону. Водопоглинання при повному просочуванні зменшується у 5...6 разів і досягає менше 1% за масою. Просочення бетону практично повністю виключає руйнуючий вплив на структуру бетону тиску льоду і гідравлічного тиску води, що призводить до відповідного підвищення стійкості матеріалу в умовах поперемінного заморожування і відтавання. Просочений

полімерами бетон не виявляє ознак руйнування у сульфатних, магнезіальних, сольових і лужних середовищах, має значно більш високу кислотостійкість.

Таблиця 2.38

Вплив виду полімеру на міцність бетонополімеру

Вид полімеру	Витрата полімеру, %	Міцність, МПа				Модуль пружності, МПа ^{10⁴}	
		на стиск		на розтяг			
		Р	Т	Р	Т	Р	Т
Контрольний без полімеру	–	36,52		2,9		2,42	
Поліметил-метакрилат	4,6...6	140	126	11,3	10,5	4,37	4,3
Полістирол	4,2...6	97	61	7,6	5	4,37	3,6
Акрилонітрил	3,2...6	100	75	7,2	6	4,1	2,92
Хлорстирол	4,9...6,9	111	100	7,8	8,3	3,88	2,88

Примітка. Р – радіаційна полімеризація; Т – термokatалітична полімеризація.

Заповнення пор бетону полімерами призводить до суттєвого покращення зносостійкості при стиранні, кавітаційної стійкості, опору динамічним навантаженням.

Бетонополімери – перспективні матеріали для отримання високоміцних і високодовговічних виробів і конструкцій – труб, колон, плит водоскидів, елементів мостів, тунелів, деталей градирень, морських споруд.

Полімерцементними називаються бетони, які модифіковані полімерними добавками. Перший патент на застосування полімерцементу з добавкою латексу був виданий Крессону в 1923 р.

В якості полімерних добавок 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 (диетиленгліколеві,

сечовиноформальдегідні, ацетонформальдегідні та ін.).

Дисперсії еластомерів і термопластів у полімерцементні суміші вводять зазвичай у кількості 10...20% від маси цементу, водорозчинні смоли – 1...3%. Для запобігання коагуляції еластомерів при змішуванні їх із цементом необхідне введення стабілізаторів (гідрофільних колоїдів, електролітів). Водорозчинні смоли застосовують без або з отверджувачем і вводять у воду замішування.

Модифіковані цементні суміші відрізняються від звичайних підвищеною водоутримувальною здатністю, яка збільшується з ростом полімерцементного відношення. Більшій водоутримувальній здатності полімерцементних сумішей сприяють гідрофільність і колоїдні властивості полімерів. Це дає можливість значно покращити легкоукладальність, запобігати “висиханню”, досягати гарного зчеплення з пористими основами.

Рухомість полімерцементних сумішей збільшується як із збільшенням полімерводоцементного, так і полімерцементного відношення. У більшості модифікованих складів спостерігається значне повітровтягування через дію ПАР, що наявні в полімерних добавках у вигляді емульгаторів і стабілізаторів.

Тужавлення цементу в бетонах, модифікованих полімерною добавкою, зазвичай сповільнюється по мірі збільшення полімерцементного відношення, особливо при наявності у полімерах добавок ПАР, які сповільнюють процеси гідратації.

Підвищення міцності цементних бетонів на розтяг і їх деформативність – один із основних результатів введення полімерних добавок. При введенні добавок полівінілацетату (ПВА) і латексів можливе збільшення міцності при згині в 2...3 рази. Наявний також ріст граничної розтяжності та зчеплення з поверхнею старого бетону й арматури. Так, введення ПВА в якості добавки до розчинів підвищує розтяжність до 2 разів. Однак цей ефект відчувається лише в повітряно-сухих умовах тверднення. На відміну від ПВА добавки водорозчинних смол позитивно впливають на розтяжність як при сухих, так і при водних умовах тверднення, хоча величина цього ефекту і менш значна.

Міцність при зсуві, що характеризує клеючу здатність при введенні полімерних добавок, збільшується в 3...8 разів. Суттєвим також є збільшення ударної міцності, стійкості до стирання,

водонепроникності та корозійній стійкості.

За даними М.Брокарда полівінілацетатцементний бетон, що зберігався в умовах 50%-й вологості при полімерцементному відношенні (П/Ц) 0,05 має у 3 рази більшу стійкість до стирання, ніж звичайний бетон. При П/Ц=0,1 і П/Ц=0,2 цей показник відповідно зростає у 12 та 20 разів.

Для полімерцементних матеріалів характерна підвищена усадка. При полімерцементному відношенні 0,15 для бетону з добавкою ПВА усадка приблизно на 25% вища усадки звичайного бетону. Величина усадки залежить насамперед від вмісту води в полімерній дисперсії, у меншій мірі від виду полімеру.

При зберіганні у воді зразки з бетону із добавкою ПВА набухають у кілька разів сильніше звичайних цементних бетонів. На відміну від полімерних дисперсій добавки водорозчинних смол призводять до помітного зниження деформацій усадки і набрякання. При підвищених дозах полімерів, особливо в умовах зволоження і підвищення температури, суттєво зростає повзучість.

Зниження пористості і заповнення пор полімерами, а також залученим повітрям призводить до підвищення морозостійкості бетонів.

2.4. Проектування складів гідротехнічних бетонів

Проектування складів бетону – важлива технологічна задача, яка включає обґрунтування виду і співвідношення вихідних компонентів бетонної суміші, що забезпечують задані проектні параметри якості бетону при прийнятих умовах оптимальності. Такі умови прогнозують зазвичай досягнення мінімальної вартості бетону і, відповідно, при прийнятих вихідних матеріалах і добавках – мінімальної витрати цементу.

Задача проектування складу гідротехнічного бетону, як і інших спеціальних бетонів, відноситься до т.зв. *багатопараметричних задач*, коли, поряд з міцністю бетону при заданій легкоукладальності бетонної суміші, його склад повинен забезпечити комплекс інших не менш важливих властивостей: морозостійкість, водонепроникність, тріщиностійкість і т.д. Відмінною рисою таких задач є необхідність знаходження таких значень параметрів складу бетонної суміші: цементно-водного

2. Гідротехнічні бетони

відношення, витрати води, вмісту піску в суміші заповнювачів та ін., які дають можливість забезпечити весь комплекс нормованих властивостей. При цьому “ножиці”, що часто утворюються за основними параметрами суміші (цементно-водному відношенні (Ц/В), витраті води (В) і цементу (Ц), частки піску в суміші заповнювачів (τ)), які необхідні для досягнення певних властивостей, можна регулювати шляхом правильного вибору вихідних матеріалів і добавок. Зокрема, при достатній проектній міцності і підвищеній морозостійкості бетону “ножиці” за необхідним значенням Ц/В можна зменшити і перемістити у бік менших Ц/В шляхом введення за допомогою ПАР певного об’єму залученого повітря.

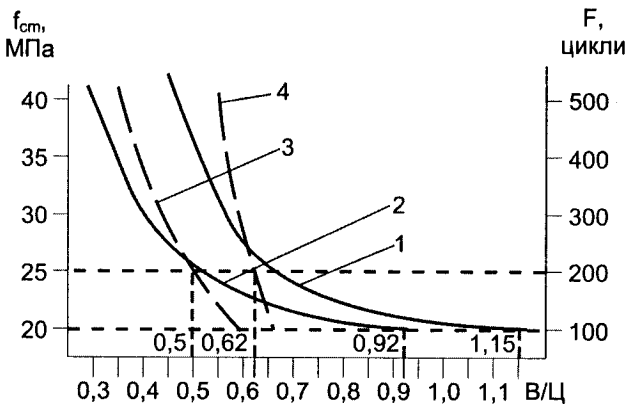


Рис.2.30. Зміна В/Ц залежно від заданих значень міцності та морозостійкості бетону:

1 – крива f_{cm} без втягнутого повітря; 2 – із 20 л втягнутого повітря (міцність розрахована для $R_d = 50$ МПа); 3 – крива морозостійкості бетону без втягнутого повітря; 4 – із 20 л втягнутого повітря

При цьому характерно, що значно збільшуючи можливе В/Ц для досягнення заданої морозостійкості, залучене повітря в той же час дещо зменшує необхідне В/Ц із умови міцності. При цьому загальний позитивний ефект зменшення витрати цементу може бути досить значним особливо в бетонах із високими значеннями морозостійкості при помірному нормованому значенні міцності. З рис.2.30, який наведений в якості прикладу, слідує, що міцність

бетону на стиск $f_{cm} = 20$ МПа і морозостійкість F200 забезпечуються на певних вихідних матеріалах без повітрявтягаючої добавки при $V/C=0,5$, із введенням втягнутого повітря – $V/C=0,62$.

Аналогічно, “ножиці” за витратою води утворюють, наприклад, показники легкоукладальності бетонної суміші та усадки бетону (рис.2.31).

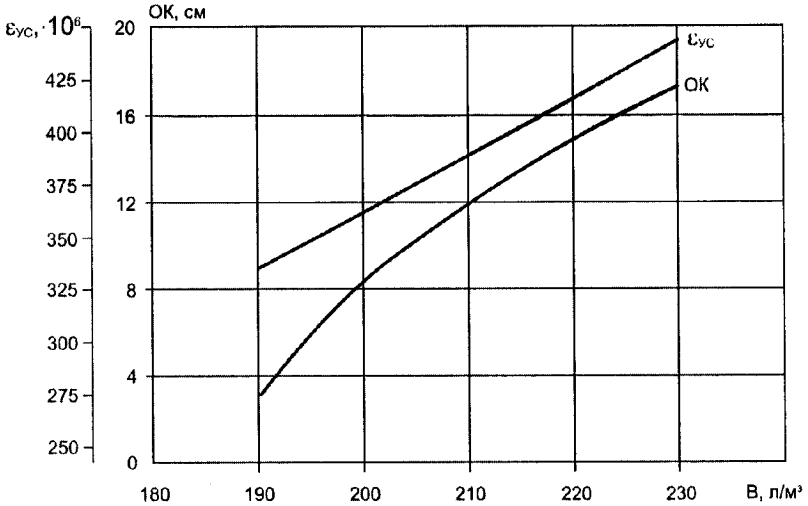


Рис.2.31. Вплив водовмісту на рухомість бетонної суміші й усадку:

Примітка. Залежність ОК від В прийнята для рядових матеріалів; усадка бетону $\epsilon_{ус}$ розрахована за формулою $\epsilon_{ус} \cdot 10^6 = 0,125V\sqrt{V}$

Загальна схема багатопараметричного проектування складу бетону (БПСБ) полягає в наступному:

1. З урахуванням проектних вимог до бетону, технологічних умов і техніко-економічного аналізу вибирають вихідні компоненти бетонної суміші і її легкоукладальність.

2. У тих випадках, коли нормуються властивості бетону, які однозначно пов'язані з міцністю бетону при стиску (міцність при розтягу, згині, модуль пружності, умовна розтяжність та ін.), визначається значення f_{cm} , що забезпечує всі задані властивості.

3. З урахуванням активності цементу, якісних особливостей заповнювачів, умов тверднення та інших факторів визначається C/V , що забезпечує задані властивості.

4. Для досягнення необхідного показника легкоукладальності і при необхідності інших властивостей бетонної суміші та бетону (наприклад, усадки) при використанні даних вихідних матеріалів і добавок визначається витрата води (B). При цьому, у випадку виходу за межі діапазону C/V в якому витрата води практично не змінюється при даній легкоукладальності суміші, тобто діє правило постійної водопотреби, витрата води коректується із урахуванням C/V .

5. При нормуванні морозостійкості бетону розраховується необхідний об'єм емульгованого повітря і уточнюється необхідне C/V .

6. При знайдених значеннях B і C/V перевіряється можливість досягнення нормованих властивостей, які визначаються цими двома технологічними параметрами. У випадку недосягнення нормованих параметрів виконується додаткове коректування B і C/V із використанням при необхідності спеціальних технологічних заходів (введення добавок та ін.).

7. З врахуванням остаточно знайдених C/V і B розраховується витрата цементу і перевіряється виконання обмежень, пов'язаних з витратою цементу (тепловиділення, стійкість до корозії та ін.).

8. Визначається зерновий склад дрібного і крупного заповнювача при введенні кількох фракцій, а потім їх витрати. При виборі співвідношення заповнювачів поряд з досягненням найкращої легкоукладальності і міцності приймаються до уваги й інші умови (підвищена водонепроникність, товщина конструкції, ступінь армування та ін.).

9. Розглядається можливість використання різних технологічних рішень, спрямованих на економію цементу, зниження енерговитрат, зменшення вартості бетонної суміші.

Проектування складів бетону може виконуватись експериментальними і розрахунково-експериментальними методами. Експериментальні методи доцільні на стадії технологічної підготовки будівництва при великих об'ємах бетонних робіт. Розрахунково-експериментальні методи

прискорюють підбір складів за рахунок використання емпіричних формул, табличних і графічних даних. Однак перед рекомендацією розрахункових складів виробництву вони повинні бути експериментально перевірені і, при необхідності, відкоректовані.

При будівництві великих гідровузлів проектною організацією визначаються і економічно обґрунтовуються джерела надходження цементу, заповнювачів і добавок. Роботи по проектуванню основних складів бетону повинні бути закінчені не пізніше ніж за півроку до початку бетонних робіт.

Число видів і марок цементу рекомендується відповідно до “Правил виробництва бетонних робіт при зведенні гідротехнічних споруд” не більше двох, а число постачальників цементу, як правило, обмежується одним заводом.

Рухомість і жорсткість бетонної суміші, що укладається в монолітні конструкції, призначаються залежно від їх розмірів, густоти армування, способів транспортування і засобів ущільнення, які застосовуються (табл.2.39).

Таблиця 2.39
Рекомендовані значення рухомості бетонної суміші
при її укладанні

Характеристика конструкцій	Осадка стандартного конуса, см
Масивні бетонні конструкції без робочої арматури	1...3
Масивні армовані конструкції з арматурою до 0,5%	3...6
Залізобетонні конструкції з арматурою до 1%	6...8
Залізобетонні конструкції з арматурою більше 1%	8...12

Для залізобетонних конструкцій із великою кількістю арматури (понад 1,5%) допускається застосування литих бетонних сумішей, що самоущільнюються. При застосуванні для масивних конструкцій (внутрішні зони гравітаційних гребель та ін.) малоцементного бетону з нульовою осадкою конуса жорсткість бетонної суміші при укладанні не перевищує 20...30 с.

Мінімальна витрата цементу приймається відповідно до табл.2.40.

Мінімальна витрата цементу в бетони

Вид конструкції	Умови експлуатації	Вид і витрата цементів		
		ПЦ-Д0 ПЦ-Д5 ССПЦ-Д0	ПЦ-Д20 ССПЦ-Д20	ШПЦ ССШПЦ ПуцПЦ
Неармовані	Без атмосферного впливу	Не нормується		
	При атмосферному впливі	150	170	170
Армовані з ненапруженою арматурою	Без атмосферного впливу	150	170	180
	При атмосферному впливі	200	220	240
Армовані з попередньо напруженою арматурою	Без атмосферного впливу	220	240	270
	При атмосферному впливі	240	270	300

Примітки: 1. ССПЦ-Д0, ССПЦ-Д20, сульфатостійкі портландцементи відповідно без добавок і з 20% активної мінеральної добавки; ШПЦ і ССШПЦ – відповідно шлакопортландцемент і сульфатостійкий шлакопортландцемент; ПуцПЦ – пуцолановий портландцемент. 2. Допускається виготовлення армованих бетонів з витратою цементу меншою мінімально допустимої при забезпеченні захисних властивостей бетону по відношенню до сталеві арматури.

Вибір максимальної крупності заповнювача залежить від розмірів перерізу конструкції і відстані між арматурними прутками. Верхня границя крупності заповнювачів у монолітному бетони не повинна перевищувати 1/3 найменшого розміру конструкції, а в залізобетонних конструкціях – 3/4 найменшої відстані між прутками арматури. При подачі бетону пневмонагнітачами та бетононасосами найбільша крупність заповнювача не повинна перевищувати 1/2 найменшої відстані між арматурними прутками. При бетонуванні плит кріплення укосів ґрунтових споруд і облицювань каналів вона не повинна перевищувати 1/3 їх товщини.

Дозування складових бетонної суміші виконують за масою з точністю для цементу, води і добавок $\pm 1\%$, заповнювачів $\pm 2\%$ (для малих бетонозмішувальних установок відповідно $\pm 2\%$ і $\pm 3\%$).

Також є рекомендації із граничних витрат цементу залежно від виду споруд (табл. 2.41).

Таблиця 2.41

Граничні витрати цементу залежно від виду споруд

Зони споруди	Витрата цементу		
	Масивні гравітаційні греблі	Аркові греблі	Збірні гідроспоруди
Греблі			
Бетон змінного рівня води і на водозливі	275	290	300
Бетон зовнішньої зони в підводних частинах	240	-	290
Бетон внутрішньої зони	160	-	-
Бетон аркових гребель	-	280	-
Бетон фундаментних частин у підшві гребель	230	240	250
Бетон зуба гребель	260	260	260
Інші частини споруди			
Рисберми	210	-	-
Понур	260	-	-
Днища шлюзів	250	-	-
Стінки шлюзів	240	-	-
Кріплення укосів:			
- у підводній частині	210	-	-
- у зоні змінного рівня води	250	-	-
Будівля ГЕС	270	-	-

Примітка: Граничні витрати цементу встановлені при умові обов'язкового застосування в бетоні відповідних поверхнево-активних добавок.

Залежно від умов експлуатації бетону в окремих частинах і зонах гідротехнічних споруд рекомендовані максимально допустимі величини водоцементного відношення (табл.2.3, 2.19).

У табл.2.42 для прикладу наведені основні склади бетону Братської ГЕС.

Основні склади бетону Братської ГЕС

Склад бетону і його характеристики	Марки бетону			
	100, W2	200, W8	200, W8 F250	400, W12
Вид цементу	Шлакопортландцемент		Портландцемент	
Водоцементне відношення	0,80	0,55	0,50	0,40
Середня густина бетонної суміші, кг/м ³	2440-2530	2420-2500	2450-2530	2400
Витрата на 1 м ³ бетону, кг:				
цемент	160	230	280	340
вода	128	126	140	136
добавка ССБ*	0,2% маси цементу			
дрібний пісок	284	270	-	-
крупний пісок	284	270	757	664
гравій фракції, мм:				
5-20	549	510	362	390
20-40	416	386	361	390
40-100	645-706	626-706	361	521
щебені фракції				
40-100	645-706	626-706	550-635	-

* ССБ – сульфітно-спиртова барда-добавка, що відноситься до групи технічних лігносульфонатів.

Експериментальний підбір складів. На першій стадії експериментального підбору складу бетону визначається співвідношення фракцій гравію (щебеню), що забезпечує їх найбільш щільну суміш. Орієнтовні співвідношення фракцій крупного заповнювача наведені в табл.2.43.

Знаходиться водовміст (В), що забезпечує необхідну рухомість бетонної суміші й оптимальний вміст піску в суміші заповнювачів (г), коли при постійному вмісті цементного тіста і В/Ц досягається найбільша рухомість бетонної суміші. Для визначення водовмісту суміші використовують довідкові рекомендації, які уточнюються експериментально. Для визначення частки піску в суміші заповнювачів попередньо призначають В/Ц і виготовляють кілька бетонних сумішей з однаковою витратою цементу при різних значеннях г, які відрізняються на 0,02...0,03. Для орієнтовного призначення величини г можна використовувати табл. 2.43.

Таблиця 2.43

Орієнтовні значення частки піску (г) у суміші заповнювачів

Витрата цементу, кг/м ³	Максимальна крупність зерен щебеню, гравію, мм	Модуль крупності піску	г при використанні	
			щебеню	гравію
250	20	1,5-2,0	0,35	0,33
		2,0-2,5	0,36	0,34
	40	1,5-2,0	0,34	0,33
		2,0-2,5	0,35	0,34
	70	1,5-2,0	0,33	0,32
		2,0-2,5	0,34	0,33
300	20	1,0-2,0	0,34	0,32
		2,0-2,5	0,35	0,33
	40	1,5-2,0	0,33	0,32
		2,0-2,5	0,34	0,33
	70	1,5-2,0	0,32	0,31
		2,0-2,5	0,33	0,32
350	20	1,0-2,0	0,32	0,30
		2,0-2,5	0,33	0,31
	40	1,5-2,0	0,31	0,30
		2,0-2,5	0,32	0,31
	70	1,5-2,0	0,31	0,30
		2,0-2,5	0,32	0,31
400	20	1,0-2,0	0,30	0,28
		2,0-2,5	0,31	0,29
	40	1,5-2,0	0,29	0,28
		2,0-2,5	0,30	0,29
	70	1,5-2,0	0,29	0,28
		2,0-2,5	0,30	0,29

Примітка. Наведені значення г рекомендуються для бетонної суміші з рухомістю 2 см. При збільшенні рухомості на кожні 2 см значення г збільшується на 0,01.

Після визначення частки піску і водовмісту, які забезпечують отримання бетонної суміші без розшарувань з необхідною рухомістю, дослідним шляхом уточнюється максимально допустиме водоцементне відношення, яке необхідне для досягнення комплексу необхідних властивостей бетону.

Витрату матеріалів на 1 м³ бетону визначають методом абсолютних об'ємів у наступній послідовності:

$$\text{Витрата цементу кг/м}^3 : \text{Ц} = \frac{B}{B/\text{Ц}}, \quad (2.31)$$

$$\text{Об'єм цементного тіста, л/м}^3: V_{\text{ц.т}} = \frac{\text{Ц}}{\rho_{\text{ц}}} + B. \quad (2.32)$$

$$\text{Об'єм заповнювачів бетону, л/м}^3: V_3 = 1000 - V_{\text{ц.т}}. \quad (2.33)$$

Об'єм V_n , л/м³ і маса П, кг/м³ піску :

$$V_n = rV_3, \quad \text{П} = \rho_n V_n. \quad (2.34)$$

Об'єм $V_{\text{щ}}$, л/м³ і маса Щ, кг/м³, крупного заповнювача:

$$V_{\text{щ}} = V_3 - V_n, \quad (2.35)$$

$$\text{Щ} = \rho_{\text{щ}} V_{\text{щ}}, \quad (2.36)$$

У наведених вище формулах $\rho_{\text{ц}}$, ρ_n , $\rho_{\text{щ}}$ – густина цементу, піску, щебеню чи гравію ($\rho_{\text{ц}} \approx 3,1$ кг/л).

Приклад. При проектуванні бетону зони змінного рівня води гідротехнічної споруди, призначеної для роботи в помірних кліматичних умовах, дослідним шляхом було встановлено, що задані вимоги до бетону забезпечуються при наступних умовах: $B/\text{Ц}=0,55$; $r=0,34$; $B=165$ кг/м³; $\rho_{\text{ц}} \approx \rho_{\text{щ}} = 2,6$ кг/л.

Визначаємо витрату матеріалів за формулами (2.31...2.36), у кг на 1 м³ бетону: $\text{Ц}=165/0,55=300$ кг/м³; $V_{\text{ц.т}}=96,8+165=261,8$ л/м³; $V_3=1000-261,8=738,2$ л/м³; $V_n=738,2 \cdot 0,34=251$ л/м³; $\text{П}=2,6 \cdot 251=652,6$ кг/м³; $V_{\text{щ}}=738,2-251=487,2$ л/м³; $\text{Щ}=487,2 \cdot 2,6=1266$ кг/м³.

Коректування складу бетонної суміші при введенні добавок полягає у визначенні оптимального дозування добавки, що забезпечує необхідний технологічний ефект із відповідно зміною витрати окремих компонентів. Після вибору оптимального дозування добавки перевіряється відповідність властивостей бетону проектним вимогам.

Розрахунково-експериментальне проектування складу. В практиці проектування складів важкого цементного бетону найбільшого поширення набули методи, що використовують ряд відомих технологічних залежностей: міцності бетону від цементно-водного відношення, правило сталості водопотреби бетонних сумішей, правило оптимального вмісту піску та ін.

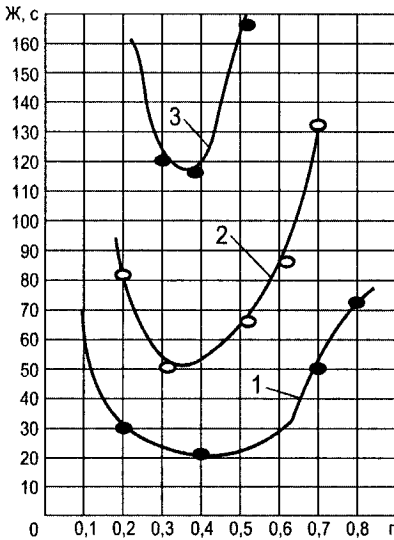


Рис. 2.32. Вплив частки піску в суміші заповнювачів на легкоукладальність бетонної суміші (за О.А. Гершбергом):

1. Номінальний склад 1:1 (цемент: суміш дрібного і крупного заповнювача).
2. Теж саме, 1:1.5.
3. Теж саме, 1:2

При вирішенні таких задач послідовно визначають значення цементно-водного відношення, витрату води з урахуванням необхідної рухомості або жорсткості бетонної суміші та витрату заповнювачів, використовуючи припущення про те, що об'єм бетонної суміші складається з абсолютних об'ємів усіх її складових. У найпростішому випадку для чотирьох компонентної суміші, необхідно, щоб були відомі три параметри: цементно-водне відношення (C/V), витрата води (B) і фактор, що характеризує співвідношення заповнювачів (частки піску в суміші заповнювачів (γ) або коефіцієнт розсунення зерен крупного заповнювача цементно-піщаним розчином (α)). Останній фактор можна розглядати як оптимізуючий (рис. 2.32), тому

що лише при деякому оптимальному його значенні, в умовах $C/V = \text{const}$, можливе досягнення найкращої легкоукладальності і відповідно мінімальної водопотреби та витрати цементу. Для бетонної суміші з великою кількістю компонентів точний аналітичний пошук оптимального співвідношення заповнювачів є досить складною задачею. У деяких випадках задача може бути спрощена при використанні емпіричних залежностей.

2. Гідротехнічні бетони

Оптимізуючим фактором також може служити витрата добавки. Зокрема добавки-пластифікатори дають можливість досягти мінімальної витрати цементу при їх оптимальній витраті (рис.2.33), що залежить від необхідної рухомості суміші, міцності бетону та показників інших властивостей.

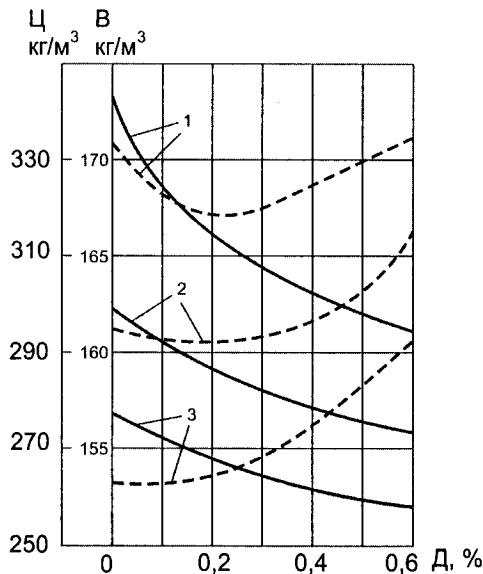


Рис.2.33 Вплив витрати ЛСТ на водопотребу бетонної суміші та і витрату цементу:

———— водопотреба

----- витрата цементу

1 - Ж=13 с; 2 - Ж= 20 с; 3 - Ж=27 с

Ц/В, що забезпечує задану міцність бетону при стиску, найбільш широко використовують єдину формулу:

$$f_{cm} = AR_u (Ц/В - 0,5), \quad (2.37)$$

де А – коефіцієнт, який уточнюється (табл.2.44) залежно від ряду факторів.

Застосування традиційного розрахунково-експериментального методу для проектування складів гідротехнічного бетону із заданою легкоукладальністю суміші і комплексом нормованих властивостей можливо при використанні обмежень по Ц/В у відповідності з відомими рекомендаціями (табл.2.3, 2.19). Однак ці розрахунки є менш точними, оскільки не враховуються взаємозв'язки між рядом нормованих показників властивостей бетону і Ц/В, а також іншими параметрами складу.

Визначення Ц/В. У практиці проектування складів для визначення

Рекомендовані значення коефіцієнта А (за В.П.Сизовим)

Вид заповнювача	Вміст глини, пілу та мулу в щебені (гравію) і піску, %	Значення коефіцієнта А для бетону на		
		щебеню	гравію гірському	гравію річковому і морському
Щебінь (гравій) пісок	0	0,64	0,6	0,57
Щебінь (гравій) пісок	0 3	0,61	0,56	0,53
Щебінь (гравій) пісок	1 3	0,58	0,53	0,5
Щебінь (гравій) пісок	2 3	0,55	0,5	0,47
Щебінь (гравій) пісок	2 5	0,52	0,47	0,44

Система розрахункового уточнення коефіцієнта А у формулі міцності розроблена В.П. Сизовим, який запропонував виражати його як алгебраїчну суму $A + \sum \Delta A_i$, де $\sum \Delta A_i$ – сума поправок, які враховують показники рухомості чи жорсткості суміші, нормальну густоту цементу, модуль крупності піску, найбільшу крупність щебеню чи гравію, вміст у заповнювачах пилюватих та глинистих домішок.

Додаткові можливості відкриваються при введенні у формулу міцності замість звичайного мультиплікативного коефіцієнта ρA , яких можна представити у вигляді:

$$\rho A = A A_1 \dots A_i \dots A_n, \quad (2.38)$$

де A_i – коефіцієнт, що враховує додатковий вплив на міцність i -го фактора ($i=1 \dots n$).

Введення мультиплікативного коефіцієнта у формулу міцності припускає допущення, що всі множники A_i взаємонезалежні. З огляду на те, що розрахункові значення міцності є лише базовими і підлягають експериментальному коректуванню, це допущення можна прийняти.

Звичайна технологічна інформація дає можливість врахувати в мультиплікативному коефіцієнті ρA , крім коефіцієнта А, як правило до 2...3 додаткових коефіцієнтів A_i . Ступінь точності

2. Гідротехнічні бетони

розрахунків залежить від рівня деталізації використовуваних коефіцієнтів. Наприклад, коефіцієнт A_{τ} , що характеризує вплив тривалості нормального тверднення, приблизно можна знайти з відомої логарифмічної залежності:

$$A = \lg n / \lg 28 = 0,69 \lg n, \quad (2.39)$$

де n - тривалість тверднення, діб.

В той же час більш точні емпіричні значення цього коефіцієнта для кожного строку тверднення n можуть перебувати в досить широкій області, залежно від речовинного і мінералогічного складу цементів та інших факторів. Для бетону на звичайному й алітовому цементі у віці 7 діб, вони коливаються в діапазоні 0,60...0,75; 90 діб – 1,1...1,35; 180 діб – 1,3...1,5. При застосуванні шлако- і пуцоланового портландцементів емпіричні значення коефіцієнта A_{τ} рівні відповідно 0,4...0,6; 1,4...1,65; 1,4...2,0. Накопичена достатня кількість експериментальних даних для врахування у формулі (2.37) впливу на міцність бетону різних хімічних добавок.

При розрахунку складу монолітного бетону, а також при врахуванні подальшого після пропарювання набору міцності, важливим фактором, що визначає міцність, є температурний режим тверднення.

Нижче приведені рівняння, яке нами отримане внаслідок обробки експериментальних даних С.А.Миронова для бетонів класів В15...В22,5 на портландцементі М 400:

$$A_{\tau,t} = -0,023 + 0,068\tau + 0,023t - 0,0016\tau^2 - 0,0003t^2 - 0,0001\tau t, \quad (2.40)$$

де τ – строки тверднення, діб; t – середня температура бетону, °С ($t=5...40^{\circ}\text{C}$).

Приклад. Необхідно розрахувати В/Ц для отримання бетону з міцністю 20 МПа у віці 7 діб при температурах тверднення (t) 10 і 30°С. Коефіцієнт A з врахуванням якості заповнювачів і інших факторів приймаємо 0,52, коефіцієнт $A_{\tau,t}$ розраховуємо з рівняння (2.40). Активність використовуваного портландцементу $R_{II}=40$ МПа.

$$B/C = \frac{A_{\tau,t} AR_{II}}{f_{cm} + 0,5A_{\tau,t} AR_{II}}. \quad (2.41)$$

$$\text{При } t=10^{\circ}\text{C, } V/C = \frac{0,57 \cdot 0,52 \cdot 40}{20 + 0,5 \cdot 0,57 \cdot 0,52 \cdot 40} = 0,46 .$$

$$\text{При } t=30^{\circ}\text{C, } V/C = \frac{0,89 \cdot 0,52 \cdot 40}{20 + 0,5 \cdot 0,89 \cdot 0,52 \cdot 40} = 0,63 .$$

Використання коефіцієнта $A_{\tau,t}$ дає можливість розглядати приклад і при іншій постановці задачі, коли визначається очікувана міцність бетону у віці 7 діб (f_{cm7}) при температурах тверднення 10 і 30°C, якщо він розрахований на міцність у 28 доби $R_{28}=30$ МПа.

$$\text{При } t=10^{\circ}\text{C, } f_{cm7} = 0,57 \cdot 30 = 17 \text{ МПа.}$$

$$\text{При } t=30^{\circ}\text{C, } f_{cm7} = 0,89 \cdot 30 = 27 \text{ МПа.}$$

Для розрахунку C/V широко використовують формули Б.Г. Скрамтаєва і Ю.М. Баженова, які відображають загальну нелінійність залежності $f_{cm} = f(C/V)$:

$$\bullet \text{ при } C/V < 2,5 \text{ (} f_{cm} < 2AR_u \text{)} - f_{cm} = AR_u(C/V - 0,5), \quad (2.42)$$

$$\bullet \text{ при } C/V \geq 2,5 \text{ (} f_{cm} \geq 2AR_u \text{)} - f_{cm} = A_1 R_u (C/V + 0,5). \quad (2.43)$$

Значення коефіцієнтів A і A_1 наведені нижче.

Матеріали для бетону	A	A_1
Високоякісні	0,65	0,43
Рядові	0,6	0,4
Зниженої якості	0,55	0,37

Багатьма авторами запропоновані й інші розрахункові формули для визначення C/V .

Додаткові можливості для розширення діапазону розв'язування задач відкриваються при використанні т.зв. "приведеного C/V ":

$$(C/V)_{пр} = \frac{C + K_{ц.е} D}{B + V_{вп}}, \quad (2.44)$$

де $K_{ц.е}$ – коефіцієнт т.зв. "цементуючої ефективності" добавок, тобто витрата цементу в кг, яку замінює 1 кг добавки: D – витрата добавки в кг/м^3 ; C і B – відповідно витрати цементу і води в кг/м^3 ;

2. Гідротехнічні бетони

$V_{\text{вп}}$ – об'єм втягнутого повітря в л/м³. У цьому випадку формула (2.37) прийме вид:

$$f_{\text{см}} = \rho A \cdot R_{\text{ц}} \left(\frac{\text{Ц} + K_{\text{ц.е}} \text{Д}}{B + V_{\text{вп}}} - 0,5 \right). \quad (2.45)$$

Перехід від “приведеного” до фактичного Ц/В можна здійснити по формулі:

$$\text{Ц/В} = (\text{Ц/В})_{\text{пр}} - \frac{K_{\text{ц.е}} \text{Д}}{B + V_{\text{вп}}}. \quad (2.46)$$

Коефіцієнт “цементуючої ефективності” легко визначити за експериментальними даними для рівномісних бетонів за формулою:

$$K_{\text{ц.е}} = \frac{\text{Ц}_1 - \text{Ц}_2}{\text{Д}}, \quad (2.47)$$

де Ц_1 – витрата цементу в бетоні без добавок; Ц_2 – витрата цементу в бетоні з добавками; Д – витрата добавки.

“Цементуюча ефективність” активних мінеральних добавок є функцією багатьох факторів, які характеризують їх склад, структуру, дисперсність, умови тверднення, вік бетону та ін. Вона залежить і від виду застосованого цементу.

Таблиця 2.45

Рекомендована витрата золи-виносу у важких бетонах

ОК, см	Марка цементу	Витрата золи, кг/м ³ для бетонів	
		пропареного	нормального тверднення
1...4	400	170	150
	500	180	150
5...9	400	190	170
	500	200	180
10...14	400	210	190
	500	215	200

При відхиленні значення Д від оптимального, величина $K_{\text{ц.е}}$ знижується, вона може переходити через нульове і набувати навіть від'ємного значення.

Орієнтовні значення рекомендованої витрати кам'яновугільної золи-виносу і її $K_{\text{ц.е}}$ наведені в табл. 2.45, 2.46.

Застосування “приведеного” Ц/В раціонально, особливо, для розрахунку складів бетонів з обмеженою витратою цементу при введенні дисперсних мінеральних добавок. При врахуванні об’єму пор заповнювачів воно ефективно також для розрахунку складів легких бетонів.

Таблиця 2.46

Значення коефіцієнта “цементуючої ефективності” ($K_{ц.е}$)
кам’яновугільної золи-виносу*

Клас бетону за міцністю	Коефіцієнт $K_{ц.е}$ для бетону			
	пропареного	нормального тверднення при марці цементу		
		600	500	400
C8/10	0,40	0,40	0,38	0,31
C12/15	0,40	0,34	0,28	0,20
C16/20	0,37	0,32	0,25	0,18
C20/25	0,33	0,29	0,22	0,15
C/3025	0,25	0,22	0,16	0,10
C30/37	0,20	0,18	0,13	0,08

* Розроблені при використанні золи Бурштинської ТЕС.

Застосування “приведеного” Ц/В раціонально, особливо, для розрахунку складів бетонів з обмеженою витратою цементу при введенні дисперсних мінеральних добавок. При врахуванні об’єму пор заповнювачів воно ефективно також для розрахунку складів легких бетонів.

У формулі (2.45) пропонується враховувати об’єм втягнутого в бетонну суміш повітря заповнювачами, добавками, у процесі ущільнення і т.д. Враховуючи те, що величина $(Ц/В)_{пр}$ повинна бути безрозмірним показником, $V_{вп}$ можна умовно прирівняти до маси води, яка при нормальних умовах займає об’єм рівний об’єму втягнутого повітря. Об’єм повітря, як еквівалент надлишкової води в бетонній суміші вперше введений у формулу міцності бетону Р.Фере. Очевидно, що прирівнювання об’єму втягнутого повітря до деякого еквівалентного об’єму води фізично припустимо, оскільки як надлишкова вода, так і залучене повітря формують у бетоні пори, що знижують міцність.

Зниження міцності бетону на стиск, розрахованою за формулою (2.45), за рахунок введення кожних 10 л. повітря

2. Гідротехнічні бетони

становить 5...6%, що відповідає експериментальним даним, отриманим при вмісті залученого повітря в бетоні від 1 до 10%.

Таблиця 2.47

Розрахункові значення показників властивостей бетону
(портландцемент М500, Ц/В=1,7)

Властивість бетону	Розрахункові формули	Показник властивості	Середнє відхилення розрахункових показників, %
Міцність бетону на розтяг при згині (f_{ctf}), МПа	$f_{ctf} = 0,08(10f_{ct})^{2/3}$	4,06	2
	$R_{ctf} = 0,045R_u (Ц/В + 0,064)$	3,97	
Міцність бетону на розтяг при розколюванні (f_{ctm}), МПа	$f_{ctm} = 0,055(10f_{ct})^{2/3}$	2,79	2
	$f_{ctm} = 0,031R_u (Ц/В + 0,064)$	2,73	
Міцність бетону при осьовому розтягу (f_{ct}), МПа	$R_{ct} = 0,046(10f_{ct})^{2/3}$	2,33	2
	$f_{ct} = 0,026R_u (Ц/В + 0,064)$	2,29	
Динамічний модуль пружності (E_d), 10^4 МПа	$E_d = \frac{4 \cdot 10^3 f_{ct}}{1 + 0,07f_{ct}}$	4,1	3
	$E_d = 205R_u (Ц/В + 2,18)$	4,0	
Умовна деформативність (ϵ_y), 10^{-6}	$\epsilon_y = R_{p,p} / E_d$	6,8	6
	$\epsilon_y = 4 \cdot 10^{-6} R_u (Ц/В + 1,5)$	6,4	

Залежності типу $P_i = f(R_u, Ц/В)$ можуть застосовуватися для розрахунку всіх показників властивостей (P_i), які також як і міцність при стиску однозначно пов'язані із щільністю цементного каменю і відповідно В/Ц або Ц/В. У табл. 2.47 поряд із відомими формулами, які пов'язують різні властивості бетону з міцністю при стиску наведені формули типу $P_i = AR_u(Ц/В + b)$, отримані при статистичній обробці експериментів із використанням портландцементу марок 400 і 500, гранітного щебеню крупністю 5...20 мм і кварцового піску з модулем крупності 1,7...1,8 при зміні Ц/В від 1 до 2,5. Всі показники властивостей випробовували за стандартизованими методиками у віці 28 діб.

Аналіз розрахункових даних, отриманих за запропонованою формулою (2.46), і формулами, які пов'язують дані властивості з міцністю при стиску, показує їх хорошу збіжність.

При розрахунку складів гідротехнічних бетонів із комплексом нормованих властивостей доцільно використовувати також відомі емпіричні залежності, що пов'язують показники даних властивостей із міцністю при стиску і параметрами складу бетонної суміші.

Вибір таких залежностей варто виконувати з урахуванням постановки задачі і наявності відповідних експериментальних даних.

Так, як показали наші досліді при використанні середньоалюмінатного портландцементу з вмістом доменних шлаків до 20%, середньозернистого кварцового піску і гранітного щебеню для досить широкого діапазону складів морозостійкість бетону апроксимується формулою виду:

$$F = A_1 f_{ct}^{A_2} \exp^{A_3 V_{вп}}, \quad (2.48)$$

де $A_3 \approx 0,35$, A_1 і A_2 – коефіцієнти, значення яких змінюється зі зміною водовмісту і відповідно рухомістю бетонної суміші; f_{cm} – міцність бетону при стиску. МПа; $V_{вп}$ – об'єм втягнутого повітря.

Необхідний об'єм втягнутого повітря у % з рівняння (2.45) можна визначити за формулою:

$$V_{вп} = \frac{\ln\left(\frac{F}{A_1 f_{ct}^{A_2}}\right)}{0,35}. \quad (2.49)$$

В якості емпіричних залежностей можна використати і поліноміальні математичні моделі, отримані при статистичній обробці експериментальних даних, що одержані із застосуванням факторного планування.

Визначення витрати води. Водопотреба – одна з найважливіших технологічних властивостей бетонних сумішей, яка однозначно пов'язана з їх легкоукладальністю і суттєво впливає на ряд технічних властивостей затверділого бетону.

У практиці проектування складів бетону водопотребу бетонних сумішей визначають зазвичай по усередненим емпіричним даним за допомогою графіків або таблиць (табл. 2.48),

2. Гідротехнічні бетони

які пропонують деякі базові значення витрати води в л/м^3 залежно від показників рухомості і жорсткості суміші та уточнення залежно від особливостей вихідних матеріалів.

Таблиця 2.48

Орієнтовна витрата води (V_0) залежно від виду заповнювачів і легкоукладальності бетонної суміші

Легкоукладальність		Витрата води, л/м^3 при максимальній крупності заповнювача, мм			
Осадка конуса, см	Жорсткість, с	10	20	40	70
16...20	-	237	228	213	202
12...16	-	230	220	207	195
10...12	-	225	215	200	190
8...10	-	215	205	190	185
5...7	-	210	200	185	180
2...4	-	200	190	175	170
-	10...15	185	175	160	155
-	15...20	175	165	150	145
-	25...35	170	160	145	140
-	40...50	160	150	135	130

Примітки: 1. При збільшенні вмісту в щебені мулу та пилу понад 1% і частинок менше 5 мм вище 5% витрата води збільшується на 1...2 л на кожний відсоток. При збільшенні вмісту в піску мулу та пилу більше 3% – на 2 л/м^3 на кожний відсоток. 2. Витрата води замішування наведена для бетонних сумішей, виготовлених на щебені з магматичних порід. Для бетонів на гравії витрата води зменшується на 10 л/м^3 . 3. Витрата води дана для бетонних сумішей на портландцементі з нормальною густиною цементного тіста 26-28 %, і середньозернистому піску ($M_k = 2-2,5$) без пластифікуючих добавок. При зміні нормальної густоти цементного тіста на кожний відсоток у бік зменшення витрата води зменшується на 3-5 л, у бік збільшення – збільшується на 3-5 л. При зміні модуля крупності піску на кожні 0,5 у бік зменшення витрата води збільшується на 3-5 л, у бік збільшення – зменшується на 3-5 л.

При цьому широко використовується *правило сталості водопотреби*, відповідно до якого витрата води для досягнення необхідної легкоукладальності суміші в певному діапазоні витрати цементу чи Ц/В залишається практично постійною.

Поряд із графічними та табличними рекомендаціями для орієнтовного розрахунку витрати води запропоновано різні рівняння регресії. Так, І.М. Грушко запропоновані рівняння водопотреби бетонних сумішей для рухомих (B_0) і жорстких (B_0^1) бетонних сумішей із урахуванням питомої поверхні щебеню ($S_{щ}$, $\text{м}^2/\text{м}^3$), водопотреби піску (B_n) і нормальної густоти цементу ($\text{НГ}, \%$):

$$B_0 = 60 + 4OK + 0,07S_{щ} + 5B_n + 1,5\text{НГ}, \quad (2.50)$$

$$B_0^1 = (60 + 0,07S_{щ} + 5B_n) \frac{1,38}{\sqrt{Ж}}. \quad (2.51)$$

Питому поверхню в м^2 на 1 м^3 крупного заповнювача, ущільненого протягом хвилини на стандартному вібростолі ($S_{щ}$), визначають за формулою:

$$S_{щ} = K \frac{\rho_{\text{ом}}}{\rho_{щ}} (a_{40} + 2a_{20} + 4a_{10} + 8a_5), \quad (2.52)$$

де K – коефіцієнт, що характеризує вплив форми зерен щебеню чи гравію. При вмісті зерен лещадної форми у щебені менше 15% $K=1,5$, менше 30% $K=1,6$, більше 30% $K=1,7$. Для гравію $K=1,0 \dots 1,25$; $\rho_{\text{ом}}$ і $\rho_{щ}$ – відповідно насипна та істина густина крупного заповнювача; a_{40} , a_{20} , a_{10} , a_5 – залишки на ситах 40, 20, 10 і 5 мм.

Остаточне корегування необхідної витрати води для досягнення заданого показника легкоукладальності повинно виконуватися в процесі виробничої адаптації складів. Задача розрахунку витрати води полягає у врахуванні найбільш значимих факторів, до числа яких можна віднести і ефект впливу пластифікуючих добавок, якщо такі вводяться. У табл.2.49 приводяться значення поправочних коефіцієнтів до розрахункового водовмісту бетонних сумішей, отриманих на рядових матеріалах при введенні пластифікатора ЛСТ і суперпластифікатора С-3.

Відоме необхідне цементно-водне відношення і витрата води дають можливість легко розрахувати необхідну витрату цементу на 1 м^3 бетонної суміші:

$$Ц = В \cdot (Ц/В). \quad (2.53)$$

Значення поправочних коефіцієнтів до розрахункового водовмісту бетонних сумішей при використанні пластифікуючих добавок

Рухомість, см	Жорсткість, с	Цементно-водне відношення				
		1,4	1,8	2,2	2,6	3,0
-	5...20	<u>0,96</u>	<u>0,95</u>	<u>0,94</u>	<u>0,93</u>	<u>0,92</u>
		0,88	0,85	0,83	0,81	0,80
1...4	-	<u>0,93</u>	<u>0,92</u>	<u>0,92</u>	<u>0,92</u>	<u>0,91</u>
		0,86	0,84	0,82	0,80	0,79
5...9	-	<u>0,91</u>	<u>0,91</u>	<u>0,90</u>	<u>0,90</u>	<u>0,89</u>
		0,82	0,80	0,79	0,78	0,77
10...16	-	<u>0,90</u>	<u>0,89</u>	<u>0,88</u>	<u>0,87</u>	<u>0,87</u>
		0,80	0,78	0,77	0,76	0,75

Примітка. У чисельнику наведені значення при застосуванні добавок типу ЛСТ 0,25% маси цементу, у знаменнику - С-3 0,7% маси цементу.

Визначення витрати заповнювачів. Однієї з основних задач оптимізації складів бетону є визначення співвідношення заповнювачів, що забезпечує мінімальну витрату цементу. У бетоні із заданими показниками міцності та легкоукладальності вибір співвідношення дрібного і крупного заповнювачів оснований на правилі оптимального вмісту піску, відповідно до якого при заданій витраті цементного тіста бетонна суміш має найкращу легкоукладальність або відповідно найменшу водопотребу лише при певній витраті піску.

Для розрахунку співвідношення дрібного (П) і крупного (Щ) заповнювачів у бетоні використовують кілька параметрів. Одним з них є *об'ємне відношення заповнювачів* r' :

$$r' = V_n : V_{щ} = \frac{\rho_{щ}}{\rho_n}, \quad (2.54)$$

де V_n і $V_{щ}$ – абсолютні об'єми; ρ_n і $\rho_{щ}$ – густини дрібного і крупного заповнювачів.

При застосуванні в якості заповнювача кварцового піску і щебеню чи гравію із щільних порід, враховуючи, що $\rho_{щ} \approx \rho_n$ можна з достатньою для практики точністю приймати $r' = П/Щ$.

Більш часто використовується параметр r – об'ємна частка дрібного заповнювача в суміші дрібного і крупного заповнювачів:

$$r = \frac{\Pi / \rho_{\Pi}}{\Pi / \rho_{\Pi} + \text{Щ} / \rho_{\text{Щ}}} \quad (2.55)$$

Параметри r' і r пов'язані співвідношенням $r = \frac{r'}{1 - r'}$ або

$$r' = \frac{r}{1 + r}$$

Знаючи необхідні об'єми цементного тіста ($V_{\text{ц.т}}$) і залученого повітря ($V_{\text{зн}}$), можна легко визначити абсолютний об'єм суміші заповнювачів (V_3) ($V_3 = 1000 - \text{Ц} / \rho_{\text{ц}} - \text{В} / \rho_{\text{в}} - V_{\text{зн}}$), а потім необхідні витрати дрібного та крупного заповнювачів:

$$V_{\Pi} = V_3 \cdot r; V_{\text{щ}} = V_3 - V_{\Pi}, \quad (2.56)$$

або

$$V_{\text{щ}} = \frac{V_3}{1 + r'}; V_{\Pi} = V_3 - V_{\text{щ}} \quad (2.57)$$

Витрати дрібного та крупного заповнювачів за масою:

$$\Pi = V_{\Pi} \rho_{\Pi}; \quad \text{Щ} = V_{\text{щ}} \rho_{\text{щ}} \quad (2.58)$$

У широко застосовуваних розрахунково-експериментальних методах проектування складів бетону для визначення витрат піску і щебеню передбачається використання коефіцієнта заповнення порожнин і розсунення зерен щебеню (гравію) цементно-піщаним розчином – α . Цей коефіцієнт (*коефіцієнт розсунення*) справедливий при допущенні, що бетонну суміш можна представити як двофазну систему, яка складається із крупного заповнювача в стандартному насипному стані і цементно-піщаного розчину. У цьому випадку формулюється умова:

$$\frac{\text{В}}{\rho_{\text{в}}} + \frac{\text{Ц}}{\rho_{\text{ц}}} + \frac{\Pi}{\rho_{\Pi}} = \alpha P_{\text{щ}} \frac{\text{Щ}}{\rho_{\text{н.щ}}}, \quad (2.59)$$

де $P_{\text{щ}}$ – пустотність крупного заповнювача, $\rho_{\text{н.щ}}$ – його насипна густина; $\rho_{\text{в}}$, $\rho_{\text{ц}}$, ρ_{Π} – густина відповідно води, цементу та піску.

Параметри r і α взаємопов'язані:

$$\alpha = \frac{(V_{\text{ц.т}} + rV_3)}{(1 - r)P_3V_3} \quad (2.60)$$

де $V_{\text{ц.т}}$ – об'єм цементного тіста.

2. Гідротехнічні бетони

Витрати крупного і дрібного заповнювачів можна легко знайти рішенням системи 2-х рівнянь матеріального балансу. Перше рівняння в системі (2.61) відображає рівність абсолютного об'єму бетонної суміші сумі абсолютних об'ємів вхідних у неї компонентів, друге – відповідність об'єму цементно-піщаного розчину об'єму порожнин крупного заповнювача з урахуванням необхідного розсунення для забезпечення необхідної легкоукладальності суміші:

$$\frac{Ц}{\rho_{ц}} + \frac{В}{\rho_{в}} + \frac{П}{\rho_{п}} + \frac{Щ}{\rho_{щ}} = 1000$$

$$\frac{Ц}{\rho_{ц}} + \frac{В}{\rho_{в}} + \frac{П}{\rho_{п}} = \alpha P_{щ} \frac{Щ}{\rho_{н.щ}},$$
(2.61)

де $\rho_{ц}$, $\rho_{в}$, $\rho_{п}$ і $\rho_{щ}$ – істинна густина відповідно цементу, води, дрібного та крупного заповнювачів, кг/л; $P_{щ}$ – пустотність крупного заповнювача, $\rho_{н.щ}$ – його насипна густина, кг/л.

Таблиця 2.50

Коефіцієнт розсунення α
(для пластичних бетонних сумішей)

Витрата цементу, кг/м ³	Значення α при В/Ц					
	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
250	–	–	–	1,26	1,32	1,38
300	–	–	1,3	1,36	1,42	–
350	–	1,32	1,38	1,44	–	–
400	1,31	1,4	1,45	–	–	–
500	1,44	1,52	–	–	–	–
600	1,52	1,56	–	–	–	–

Примітки. 1. Таблиця складена для пісків з водопотребою $V_{п}=7\%$. При збільшенні $V_{п}$ на кожен відсоток α зменшується на 0,03, а при зниженні $V_{п}$ зростає відповідно на 0,03. **2.** Для жорстких бетонних сумішей ($Ц < 400$ кг/м³) $\alpha = 1,05...1,15$.

В результаті рішення системи(2.61):

$$Щ = \frac{1000}{\frac{1}{\rho_{щ}} + \frac{\alpha \rho_{щ}}{\rho_{н.щ}}},$$
(2.62)

$$П = (1000 - Ц/\rho_{ц} - В/\rho_{в} - Щ/\rho_{щ}) \rho_{п}.$$
(2.63)

Таблиця 2.51

Емпіричні залежності для розрахунку складів
гідротехнічних бетонів

Властивості бетону	Формула	Умовні позначення
Водонепроникність	$K_{\phi} = A f_{ct}^m$ (2.64) $A \approx 126, m \approx 7,7$	K_{ϕ} – коефіцієнт фільтрації; f_{ct} – міцність бетону при стиску, МПа
Тепловиділення, кДж/м ³	$Q = \frac{c \rho_0}{K} (t_{кр} - t_{б.н})$ (2.65)	c – питома теплоємність бетону кДж/кг.град; ρ_0 – середня густина бетону; $t_{кр}$ і $t_{б.н}$ – відповідно критичне значення температури і початкова температура; K – коефіцієнт, що залежить від умов охолодження бетону.
	$Q = q_{\tau} \tau$ (2.66)	q_{τ} – питома тепловиділення цементу при заданих значеннях тривалості і температури тверднення;
Питома тепловиділення цементу, кДж/кг у віці 7 діб	$q_{\tau} = 26,15 R_{ц}^{2/3}$ (2.67)	$R_{ц}$ – активність цементу, МПа
Критерій термічної тріщиностійкості	$K_{\tau} \approx 23 \cdot 10^8 \frac{\epsilon_{пр}}{Q}$ 2.68	$\epsilon_{пр}$ – гранична розтяжність бетону
Усадка бетону	$\epsilon_{yc} \cdot 10^6 = 0,125 B \sqrt{B}$ (2.69)	B – водовміст бетонної суміші

Коефіцієнт розсунення α визначають за довідковими даними (табл.2.50).

При рішенні системи рівнянь (2.61) також при необхідності може враховуватися повітря, що знаходиться в бетонній суміші.

При розрахунку складів гідротехнічного бетону при необхідності використовується ряд додаткових емпіричних залежностей. Деякі з них наведені в табл.2.51.

Коректування складу бетону. Неминучі відхилення фактичних показників властивостей бетонних сумішей і бетонів від розрахункових, обумовлюють і певну приблизність розрахункових складів бетону. Уточнення розрахункових складів виконується експериментально в лабораторії. Залежно від конкретних можливостей будівельної лабораторії і графіка проведення робіт з використанням даного бетону, об'єм лабораторних робіт при експериментальному уточненні складу бетону може бути різним. Повне коректування досягається при експериментальному уточненні всіх параметрів складу суміші: водовмісту, водоцементного відношення, частки окремих фракцій у складі заповнювача, об'єму залученого повітря. В окремих випадках можливе неповне лабораторне коректування (наприклад, лише водовміст бетонної суміші, що забезпечує задану легкоукладальність, з подальшим уточненням інших параметрів шляхом випробування бетону виробничого виготовлення).

На відміну від лабораторних (номінальних) складів бетону, що приводяться для сухих матеріалів, у виробничих умовах враховують, що пісок і щебінь (гравій) мають деяку вологість.

Виробничі витрати дрібного ($P_{\text{вир}}, \text{кг/м}^3$) і крупного ($\text{Щ}_{\text{вир}}, \text{кг/м}^3$) заповнювачів збільшують на масу води, яка знаходиться в них:

$$P_{\text{вир}} = P \cdot (1 + W_{\text{п}}), \quad (2.70)$$

$$\text{Щ}_{\text{вир}} = \text{Щ} \cdot (1 + W_{\text{щ}}), \quad (2.71)$$

де $P, \text{Щ}$ - витрата піску і щебеню у розрахунковому складі; $W_{\text{п}}, W_{\text{щ}}$ - вологість піску і щебеню, частки одиниці.

Відповідно виробничу витрату води ($V_{\text{вир}}$) зменшують у порівнянні з лабораторною на масу води, яка знаходиться в заповнювачах:

$$V_{\text{вир}} = V - P \cdot W_{\text{п}} - \text{Щ} \cdot W_{\text{щ}}. \quad (2.72)$$

У деяких випадках виробничий склад бетону доцільно виражати у відносних масових частках, при цьому частку

цементу приймають рівній одиниці. У цьому випадку для виробничого складу:

$$1 : П : Щ = \frac{Ц}{Ц} : \frac{П_{\text{вир}}}{Ц} : \frac{Щ_{\text{вир}}}{Ц} . \quad (2.73)$$

Якщо бетонозмішувач, який використовується для приготування суміші, характеризується місткістю за об'ємом сухих матеріалів, тоді попередньо визначається коефіцієнт виходу бетонної суміші (β_6). Коефіцієнт виходу зазвичай перебуває в межах 0,55-0,75 і характеризується відношенням об'єму бетонної суміші до суми об'ємів цементу і заповнювачів у рихленасипному стані:

$$\beta_6 = \frac{1}{\frac{Ц}{\rho_{\text{н.ц}}} + \frac{П_{\text{пр}}}{\rho_{\text{н.п}}} + \frac{Щ_{\text{пр}}}{\rho_{\text{н.щ}}}} , \quad (2.74)$$

де $\rho_{\text{н.ц}}$, $\rho_{\text{н.п}}$, $\rho_{\text{н.щ}}$ – відповідно насипна густина цементу, піску і щебеню (гравію).

Рекомендовані виробничі склади, доцільно адаптувати в умовах реального виробництва.

Задача *адаптації складів* полягає у їх коректуванні з уточненням емпіричних коефіцієнтів, які використовуються в усереднених залежностях на основі “зворотнього зв'язку” тобто результатів поточних випробувань бетону виробничого виготовлення. Періодичність адаптації залежить від стабільності вихідних матеріалів і виробничих параметрів і спрямована на досягнення проектних показників якості бетону при мінімально можливому коефіцієнті їх варіації. Для адаптації складів можливе використання звичайних, експресних і автоматичних способів вимірювання нормованих показників і технологічних параметрів.

3. ДОРОЖНІ БЕТОНИ

3.1. Загальна характеристика

Будівництво автомобільних доріг і аеродромів є однієї з найбільш розвинених галузей будівництва, де застосовують поряд з асфальтовими і цементні дорожні бетони, які працюють у складних експлуатаційних умовах і повинні відповідати ряду спеціальних вимог.

Дорожні цементні бетони підрозділяють на бетони для одношарових і верхнього шару двошарового покриття; для нижнього шару двошарового покриття; для основи доріг і аеродромів. За умовами тверднення дорожні бетони поділяють на бетони, що тверднуть у природних умовах, і вкладаються при зведенні об'єкту (монолітні бетони), бетони прискореного тверднення, які використовуються на заводах і полігонах для виробництва різних бетонних та залізобетонних виробів. Цементні дорожні бетони підрозділяють також за видом і крупністю заповнювачів, консистенцією бетонних сумішей, показниками міцності й іншими властивостями.

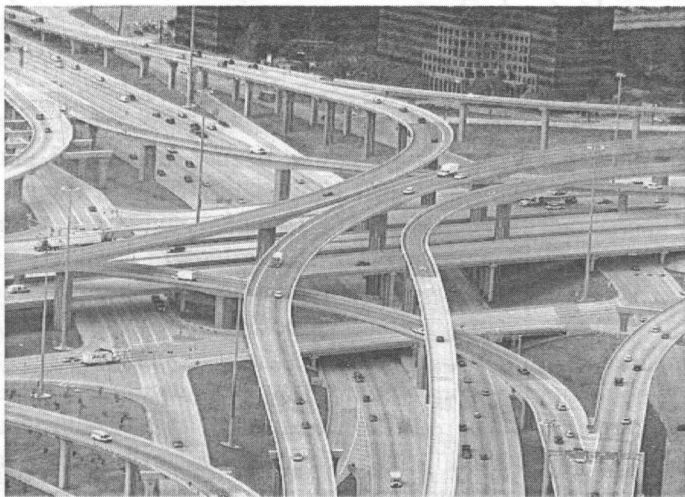


Рис.3.1 П'ятирівнева транспортна розв'язка в Далласі, США

Цементобетонні покриття найбільшою мірою застосовують на вантажонапружених магістралях та аеродромах (рис.3.1). У порівнянні з покриттями на основі органічних в'язучих – бітумів і дьогтів вони мають стабільні експлуатаційні показники і високу довговічність. Встановлено, що при русі зі швидкістю 90...110 км/год на цементобетонних покриттях автомобільних доріг витрачається приблизно на 5...10% менше палива ніж на асфальтобетонних.

Отримання дорожніх бетонів підвищеної міцності, деформативності та морозостійкості досягається за допомогою комплексу технічних рішень – вибору вихідних матеріалів і добавок, проектування оптимальних складів, реалізації ефективних технологій виготовлення і укладки бетонної суміші, догляду за бетоном.

Цементобетонні покриття можуть бути одношаровими чи двошаровими з товщиною верхнього шару не менше 6 см. У нижньому шарі двошарового бетонного покриття можуть застосовуватися менш міцні і морозостійкі кам'яні матеріали.

Мінімальна товщина бетонного покриття залежить від інтенсивності руху – розрахункового навантаження на смугу. При інтенсивності руху більше 2000 транспортних одиниць за добу вона приймається 22 см, 1000...2000 – 20, 100...1000 – 16 і менше 100 – 15 см.

У дорожньому покритті влаштовують поздовжні і поперечні шви, що ділять їх на плити певної довжини і ширини. Ширину плити призначають зазвичай рівній ширині смуги руху, довжину визначають розрахунком на температурні напруження.

Поздовжній шов улаштовують при ширині покриття більше 4,5 м, щоб запобігти появі поздовжніх тріщин, які утворюються від змінного впливу транспортних засобів, спучення і усадки земляного полотна. До поперечних відносять шви розширення, стиску, короблення і робочі шви. Шви розширення підвищують поздовжню стійкість бетонного покриття при максимальному нагріванні влітку. Шви стиску влаштовують між швами розширення, щоб запобігти появі тріщин, які виникають у бетоні внаслідок зміни температури, усадки бетону та неоднорідних деформацій земляного полотна. Шви короблення підвищують поздовжню стійкість покриття, зменшують температурні напруження, підвищують тріщиностійкість і транспортно-

3. Дорожні бетони

експлуатаційні якості покриття. Робочі шви влаштовують наприкінці робочої зміни або при перерві бетонування більше ніж на 3 год.

При проектуванні і будівництві монолітних цементобетонних покриттів відстані між швами розширення призначають із урахуванням температури повітря під час бетонування і товщини плити. Бетон у дорожніх покриттях піддається впливу багаторазово повторюваних статичних і динамічних навантажень від транспортних засобів, а також комплексному впливу навколишнього середовища – зволоженню і висушуванню, нагріванню й охолодженню, заморожуванню та відтаванню з одночасним впливом солей, які застосовуються для боротьби з ожеледицею.

3.2. Властивості дорожніх бетонів і шляхи їх забезпечення

Бетонне покриття дороги працює на згин як плита на пружній основі. Тому основним показником механічних властивостей дорожніх бетонів є *міцність на розтяг при згині*. Вона призначається залежно від виду покриття і положення шару бетону в конструкції покриття дороги, а також інтенсивності розрахункового навантаження (табл.3.1).

Таблиця 3.1

Мінімальні проектні класи бетону для дорожніх цементобетонних покриттів та основ (ДБН В.2.3–4:2015)

Конструктивний шар дорожнього одягу	Категорія дороги	Інтенсивність розрахункового навантаження од/добу	Мінімальні проектні класи(марки) за міцністю	
			на розтяг при згині $V_{\text{рзг}}$ ($P_{\text{рзг}}$)	на стиск В
Монолітне одношарове покриття або віршній шар двошарового покриття	I	Більше 3000	4.8(60)	40(500)
	II,III	Більше2000	4.4(55)	35(450)
		Від 1000 до 2000	4.0(50)	30(400)
	IV	Менше 1000	3.6(45)	25(300)

Конструктивний шар дорожнього одягу	Категорія дороги	Інтенсивність розрахункового навантаження од/добу	Мінімальні проектні класи(марки) за міцністю	
			на розтяг при згині $V_{втв} (P_{втв})$	на стиск В
Нижній шар двошарових монолітних покриттів	I – II III	Більше 1000 Менше 1000	3.2(40) 2.8(35)	- -
Монолітна основа під покриття	I – IV	Будь- яка	0.8(10)	
Збірне покриття (основа)	I – IV	Будь- яка	3.6(45)	25(300)

Розрахунковий опір бетону на розтяг при згині визначають за формулою:

$$R_{ps}^p = V_{втв} K_m K_b, \quad (3.1)$$

де $V_{втв}$ – клас бетону на розтяг при згині; K_m – коефіцієнт набору міцності; для бетону природного тверднення при температурі повітря понад 10°C $K_m=1,2$, для бетону природного тверднення при температурі повітря нижче 10°C і при зимовому бетонуванні $K_m=1$; K_b – коефіцієнт втомлюваності бетону при повторному навантаженні.

Коефіцієнт втомлюваності K_b розраховують за формулою:

$$K_b = 1,08N^{-0.063}, \quad (3.2)$$

де N – сумарне число додатково приведенного розрахункового навантаження за розрахунковий термін служби.

Показник міцності на стиск є непрямою характеристикою його зносостійкості. Опір зношуванню при експлуатації дорожніх покриттів є зазвичай достатнім при міцності бетону на стиск вище 30 МПа.

Між міцністю цементного бетону на стиск і розтягом при згині є кореляційний зв'язок (рис.3.2).

Для важкого бетону міцність бетону на розтяг при згині $f_{ctв}$ залежно від міцності на стиск f_{cm} у МПа орієнтовно можна визначити за формулою:

$$f_{ctв} = 0,08(10f_c)^{2/3}. \quad (3.3)$$

3. Дорожні бетони

Міцність важкого цементного бетону при згині коливається, як правило, в інтервалі 0,1...0,2 міцності при стиску.

Співвідношення f_{cm}/f_{ctb} підвищується зі збільшенням міцності на стиск. Зі збільшенням віку бетону його міцність при згині зростає більш повільно, ніж міцність при стиску і співвідношення f_{cm}/f_{ctb} збільшується. Суттєвий вплив на опір бетону розтягу і згину чинять вид заповнювачів і характер їх поверхні: міцність підвищується при застосуванні чистих заповнювачів із гострими і шорсткуватими зернами. Міцність при згині бетону на основі щебеню на 15...20 % вища ніж бетону на гравію. Вона також збільшується при застосуванні досить міцних пористих заповнювачів, що пояснюється їх хорошим зчепленням із цементним каменем.

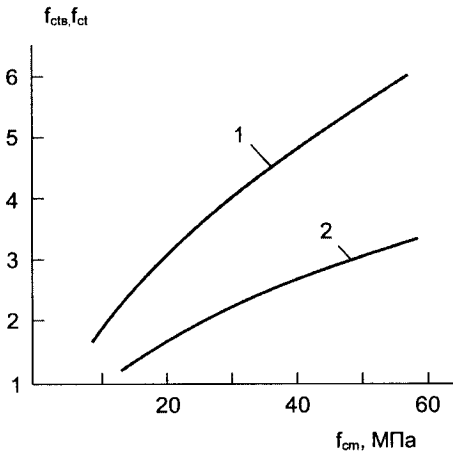


Рис. 3.2. Залежність міцності бетону на розтяг при згині f_{ctb} (1) і осьовий розтяг f_{ct} (2) від міцності при стиску f_{cm}

Значний ефект збільшення міцності бетону на згин досягається при застосуванні полімерних добавок.

За даними НДІЗалізобетону для бетонів високих і середніх марок приблизно 40% загальної міцності формується за рахунок адгезійного зчеплення розчинового каменю із щебенем; 20% — за рахунок механічного зчеплення,

викликаного мікрорельєфом поверхні щебеню. Для бетонів низьких класів (міцність розчинової частини менша 20 МПа) більше половини загальної міцності дає зчеплення. Збільшення зчеплення досягається в першу чергу зближенням цементних зерен із заповнювачами, цьому сприяють зниження В/Ц, ступеня

водовідділення і нерівномірного осідання бетонної суміші. Підвищені зчеплення з розчиновим каменем досягається при використанні пористих легких заповнювачів. До ефективних заходів, які сприяють покращенню зчеплення, відносяться використання добре перемішаних і ущільнених жорстких і особливо жорстких сумішей, що відрізняються практичною відсутністю водовідділення.

Величина міцності зчеплення суттєво зменшується зі збільшенням розмірів заповнювача, що можна пояснити збільшенням впливу усадки, а також процесами водовідділення і контракції в бетонній суміші.

Механічне зчеплення зумовлене прониканням цементного каменю в заглиблення поверхні заповнювача. При максимально

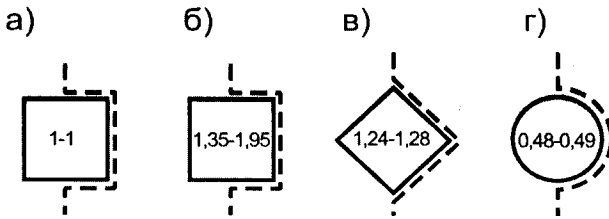


Рис.3.3. Вплив форми зерна заповнювача і положення поверхні руйнування на відносну величину зчеплення із розчином:

цифри всередині зерен – відносна величина зчеплення; пунктирна лінія – поверхня руйнування; а – куб із гладкими гранями; б – куб із двома хвилястими гранями; в – куб із гладкими гранями, повернутий на 45°; г - гладка куля

розвиненому рельєфі поверхні заповнювача міцність зчеплення може збільшуватися приблизно в 4 рази у порівнянні зі зчепленням цементного каменю із зерном заповнювача у вигляді гладкої кулі.

Вплив форми і рельєфу поверхні заповнювача на відносну величину зчеплення за даними Б.М. Виноградова наведено на рис.3.3.

Зчеплення цементного каменю із заповнювачами суттєво послабляється при наявності в останніх плівок глинистих мінералів і гідроксидів заліза. Наявність зазначених домішок у тонких

3. Дорожні бетони

фракціях призводить до збільшення водопотреби бетонних сумішей, що також негативно відображається на міцності бетону. Травлення заповнювачів кислотними або лужними розчинами сприяє як створенню розвиненого мікрорельєфу заповнювачів, так і одночасно очищенню їх поверхні. Крім того, обробка заповнювачів деякими розчинами призводить до зміни їх поверхневого заряду, що також впливає на їхню реакційну здатність. Обробка заповнювачів із кислих порід (кварциту, граніту) слабкими розчинами кислот або солей дає можливість підвищити міцність зчеплення між зернами заповнювача і цементним каменем на 20...30%, а міцність бетону – більше ніж на 20%.

Активацію адгезійної здатності заповнювачів за рахунок збільшення їх вільної поверхневої енергії можна досягти впливом електричних і магнітних полів, ультразвуковою обробкою. Під дією зовнішнього електричного поля молекули й іони, що складають тверді тіла, поляризуються, що сприяє збільшенню адгезійної міцності. Адгезії частинок сприяє також зменшення кута змочування під впливом електричного заряду. Є позитивні результати впливу електроіскрового розряду при подрібненні щебеню на хімічну активність його поверхні. Міцність при згині зразків на кварцитовому і вапняковому щебені при електрогідравлічному подрібненні гірських порід зросла більше ніж на 20%.

Відношення міцності при стиску і розтягу (згині) є показником однорідності (дефектності) структури бетону. Це відношення зменшується для дрібнозернистих бетонів нормального тверднення, виготовлених особливо на вапняковому чи шлаковому щебені і піску. Воно добре корелюється з показниками витривалості, морозостійкості та тріщиностійкості.

Вплив гранулометричного складу щебеню і піску на міцність бетону менший при розтягу і згині, ніж при стиску. Зі збільшенням цементно-водного відношення міцність бетонів при розтягу і згині росте повільніше, ніж при стиску.

Запропоновано декілька формул, що пов'язують міцність бетону на розтяг при згині (f_{ctb}) з аналогічним показником стандартного цементно-піщаного розчину ($R_{ц.з}$). З них можна виділити формули:

- Ю.М. Баженова:

$$f_{\text{ctв}} = AR_{\text{ц,з}}(\text{Ц}/\text{В} - 0,2), \quad (3.4)$$

- СоюзДорНДІ:

$$a_{\text{ctв}} = AR_{\text{ц,з}}(\text{Ц}/\text{В} - 0,1), \quad (3.5)$$

- ХНАДУ:

$$f_{\text{ctв}} = 0,42A_1A_2R_{\text{ц,з}}(\text{Ц}/\text{В} - 0,3). \quad (3.6)$$

У формулі (3.4) $A=0,42$ для високоякісних матеріалів, $0,4 - 0,42$ для рядових і $0,37 - 0,39$ – пониженої якості. Значення A в формулі (3.5) для бетону без пластифікуючих добавок – $0,39$, із пластифікуючими – $0,38$, повітровтягувальними – $0,34$, газоутворюючими – $0,36$.

Формула (3.6) дає можливість врахувати консистенцію суміші, вид щебеню і піску. При застосуванні рухомих і жорстких бетонних сумішей значення коефіцієнта A_1 при використанні вапнякового і шлакового щебеню відповідно рівні $1,17$ і $1,22$; фракціонованого гранітного щебеню $1,08$ і $1,13$; фракціонованого гравію – $1,0$ і $1,05$; рядового гравію – $0,90$ і $0,95$ і щебеню, який має пилювато-глиняну плівку – $0,85$. Значення коефіцієнта A_2 залежать від виду піску: при застосуванні штучного піску (висівок) $A_2=1,15$; чистого кварцового піску – $1,0$; піску з дуже окатаними зернами, а також забрудненого – $0,93$.

У табл. 3.4 наведені розрахункові значення $f_{\text{ctв}}$ при використанні формул (3.3...3.6) в МПа і застосуванні рядових матеріалів. Для визначення $f_{\text{ctв}}$ за формулою (3.3) розраховували спочатку за виразом $f_{\text{ct}} = AR_{\text{ц}}(\text{Ц}/\text{В} - b)$ міцність бетону на стиск f_{cm} при цьому активність цементу приймали рівною його марці при даному значенні $R_{\text{ц,з}}$.

Усі формули приведенного виду відображають деякий негативний вплив на $f_{\text{ctв}}$ крупних заповнювачів, згідно розглянутих вище уявлень. Дійсно, при $\text{Ц}/\text{В}=2,5$ характерному, як правило, при стандартному випробуванні цементно-піщаного розчину і рекомендованих значеннях коефіцієнта A для рядових матеріалів за формулою (3.5) – $0,39$, (3.4) – $0,4$ і (3.6) – $0,42 R_{\text{р,з}}$ буде відповідно рівним $0,936R_{\text{ц,з}}$, $0,92R_{\text{ц,з}}$ і $0,924R_{\text{ц,з}}$. Для порівняння R_{ct} , що слідує

3. Дорожні бетони

із формули $R_{ct} = AR_{ц}(\text{Ц/В}-0,5)$ при $\text{Ц/В}=2,5$ і $A=0,6$ дорівнює $1,2R_{ц}$.

Аналіз даних табл. 3.2 показує, що величини f_{ctb} , обчислені за формулами (3.3...3.6) досить близькі і відхилення розрахункових значень при правильному виборі коефіцієнтів не перевищують 3%. Відхилення дещо підвищуються при використанні формули (3.3), однак залишаються при цьому порівняно низькими (до 8...10%) при мінімально допустимих співвідношеннях $R_{ц,3}$ і $R_{ц}$. У багатьох випадках фактичне співвідношення $R_{ц,3}$ і $R_{ц}$ є значно вище нормативного і тоді розрахункові значення f_{ctb} за формулою (3.3) виявляються заниженими. Вибір формул для визначення f_{ctb} бетону також як і ряду інших його показників нормованих властивостей і відповідно водоцементного відношення значною мірою повинен визначатися наявною вихідною інформацією.

Таблиця 3.2

Розрахункові значення $R_{p,3}$ при використанні формул (3.3...3.6)

$R_{ц,3}$	$R_{ц}$	Ц/В	$f_{ctb} = 0,36f_{cm}^{2/3}$	$f_{ctb} = 0,4R_{ц,3}(\text{Ц/В} - 0,2)$	$f_{ctb} = 0,39R_{ц,3}(\text{Ц/В} - 0,1)$	$f_{ctb} = 0,42R_{ц,3}(\text{Ц/В} - 0,3)$
5,5	40	1,5	3,0	2,9	3,0	2,8
		2,5	4,8	5,1	5,1	5,1
6	50	1,5	3,5	5,5	5,6	3,0
		2,5	5,5	3,4	3,5	5,5
6,5	60	1,5	3,9	3,4	3,5	3,3
		2,5	6,2	6,0	6,1	6,0
7,5	60	1,5	3,9	3,9	4,1	3,8
		2,5	6,2	6,0	7,0	6,9

Важливим показником якості дорожнього бетону є *зносостійкість*, яка залежить від структури і складу верхнього шару дорожнього покриття. Зношенням називають властивість матеріалу протидіяти абразивним впливам. Його оцінюють за величиною втрати маси зразка при випробуванні в обертовому барабані. Зношення збільшується при використанні рухомих

бетонних сумішей із значним водоцементним відношенням. Зносостійкість також знижується при твердненні бетону в умовах низьких температур і недостатньої вологості середовища. Характер зношування бетону залежить від зносостійкості його компонентів, для важкого бетону зазвичай зносостійкість заповнювачів вища зносостійкості цементного каменю. В результаті цементний камінь зношується швидше заповнювача і на поверхні бетонного покриття виступають зерна заповнювача. Важливе значення має підбір оптимального гранулометричного складу заповнювачів.

Внаслідок роздавлювання і викришування заповнювачів відбувається деяке вирівнювання поверхні покриття і знову створюються умови для прискореного зношування цементного каменю. Процес зношування бетону в дорожньому покритті таким чином має циклічний характер. Для зменшення зношування покриттів поряд зі зменшенням В/Ц і підвищенням міцності цементного каменю, а також зменшенням його питомого вмісту в бетоні бажано застосовувати більш в'язкі заповнювачі з меншою крупністю. На зносостійкість бетону позитивний вплив має забезпечення надійного зчеплення заповнювачів із цементним каменем, що зменшує їх викришування.

Поверхневий шар бетону відрізняється від більш глибоких шарів за модулем пружності, величиною деформації та ін. Внутрішні напруження в результаті усадки в поверхневому шарі розвиваються більш інтенсивно, що призводить до його зниженої стійкості проти стирання. Для бетонів підвищеної якості, у яких стираність для більш глибоких шарів менша ніж для поверхневого шару, по мірі збільшення тривалості експлуатації покриттів зношування має загасаючий характер.

Нормативною характеристикою пружних властивостей дорожніх бетонів є *модуль пружності* в умовах розтягу при згині, який визначається при напруженнях, що складають 0,2 від руйнуючих.

При розрахунку бетонних покриттів приймають значення модуля пружності бетону залежно від його міцнісних характеристик (табл.3.3).

Модуль пружності піщаних бетонів у зв'язку з відсутністю в них жорсткого каркасу із зерен крупних заповнювачів і більшим

3. Дорожні бетони

вмістом цементного каменю в 1,3...1,5 рази нижче, ніж у рівномісних за $f_{\text{ств}}$ звичайних бетонів.

Модуль пружності бетону тісно пов'язаний з його міцністю. При проектуванні конструкцій для прогнозування модуля пружності бетону при завантаженні його у віці τ найбільшого застосування набули залежності типу:

$$E_b = \frac{E_m f_{\text{cm}\tau}}{S + f_{\text{cm}\tau}}, \quad (3.7)$$

де $f_{\text{cm}\tau}$ – міцність бетону при певній тривалості тверднення (τ); E_m і S – емпіричні константи. В будівельних нормах рекомендуються значення $E_m = 52000$; $S = 23$.

Таблиця 3.3

Розрахункові значення модуля пружності дорожнього цементного бетону

Клас бетону за міцністю на розтяг при згині ($B_{\text{вгв}}$)	Початковий модуль пружності E_b , МПа		Клас бетону за міцністю на розтяг при згині ($B_{\text{вгв}}$)	Початковий модуль пружності E_b , МПа	
	важкого бетону	дрібнозернистого бетону		важкого бетону	дрібнозернистого бетону
2.8	2.60	2.16	4.8	3.53	-
3.2	2.84	2.31	5.2	3.73	-
3.6	3.04	2.45	5.6	3.73	-
4.0	3.24	2.60	6.0	3.82	-
4.4	3.53	-	6.4	3.82	-

Європейським комітетом із бетону і нормами ряду країн рекомендується залежність:

$$E_b = C(f_{\text{cm}\tau})^\gamma, \quad (3.8)$$

де $C=1900$; $\gamma=0,5$.

Різними авторами запропоновані різні модифікації формули (3.8) і значення коефіцієнтів.

Розбіжності між значеннями E_b , обчисленими за формулами (3.7) і (3.8), зростають (до 35%) по мірі підвищення міцності бетону.

При значних коливаннях вмісту цементного каменю з модулем пружності $E_{\text{ц.к}}$ для бетонів з різним модулем пружності заповнювачів E_z справедлива більш загальна формула:

$$E_6 = \frac{\varphi E_{ц.к} f_{см\tau}}{\varphi SP_{ц.к} + f_{см\tau}}, \quad (3.9)$$

де $E_{ц.к}$ – граничне значення модуля пружності цементного каменю ($E_{ц.к} = 5 \cdot 10^4$ МПа); $P_{ц.к}$ – масовий вміст цементного каменю в бетоні, φ і S – коефіцієнти:

$$S \approx 80; \varphi = \frac{n}{1 + \rho_k(n-1)}, \text{ де } n = E_3/E_{ц.к}.$$

При використанні високоякісних крупних заповнювачів з вивержених порід типу граніту разом із кварцовим піском $E_3 = 5,5 \cdot 10^4$ МПа. Е.М. Щербаковим показано, що для широкої області складів бетону вираз (3.9) перетвориться у формулу:

$$E_6 \cdot 10^{-4} = \frac{5,3f_{см\tau}}{85P_{ц.к} + f_{см\tau}}. \quad (3.10)$$

Незважаючи на високий рівень кореляції, є ряд особливостей впливу факторів структури і складу бетону на його модуль пружності в порівнянні з міцністю. Експериментально встановлено, наприклад, що зниження зчеплення цементного каменю із заповнювачами не призводить до суттєвого зниження модуля пружності бетону на відміну від міцності.

При коливаннях модуля пружності заповнювачів і різному вмісті цементного каменю при постійній міцності бетону його модуль пружності, що слідує з рівняння (3.10), може перебувати в певній області і змінюватися в 1,5 рази та більше. Нормування величини модуля пружності бетону лише залежно від міцності є орієнтовним і може давати суттєву похибку.

З підвищенням температури до 200°C співвідношення між модулем пружності та міцністю бетону залишається практично незмінним.

При розрахунку бетонних покриттів деформативні властивості бетону, окрім модуля пружності, враховуються за допомогою коефіцієнта лінійного температурного розширення α_t і коефіцієнта μ .

Коефіцієнт лінійного температурного розширення (α_t) дорожніх бетонів змінюється залежно від виду і складу заповнювачів. Значення α_t для різних видів цементних бетонів в основних робочих температурних інтервалах наведені в табл. 3.4.

Значення коефіцієнта α_t для дорожніх цементних бетонів

Вид бетону	Значення $\alpha_t \cdot 10^6 (1/^\circ\text{C})$ при температурах	
	від 20° до 0°С	від 0° до 40°С
Бетон на кварцовому піску і гранітному щебеню	6,8	8,1
те ж на вапняковому щебені	4,1	5,6
Дрібнозернистий (піщаний) бетон	9,0	10,0
Карбонатний бетон	4,4	5,0

Коефіцієнт поперечних деформацій μ знаходять при навантаженні, що складає 30% руйнуючого:

$$\mu = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}, \quad (3.11)$$

де ε_1 і ε_2 – відповідно пружні відносні поздовжні та поперечні деформації зразків-призм або циліндрів.

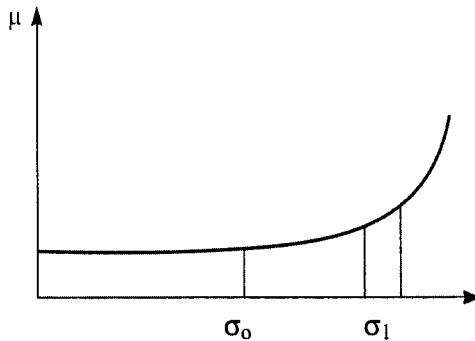


Рис.3.4. Зміна коефіцієнта поперечних деформацій бетону при осьовому стиску

До деякого значення напружень (рис.3.4) при відносно швидкому навантаженні коефіцієнт μ залишається постійним, а потім монотонно зростає до значення напруження, при якому утворюються тріщини. Величина такого напруження приблизно дорівнює 0,9 призової міцності бетону. Постійне значення коефіцієнта

Пуассона при напруженнях менших σ_0 пояснюється збереженням міцного зчеплення цементного каменю із заповнювачами, при більших напруженнях відбувається часткове порушення зчеплення. Коефіцієнт Пуассона для піщаних і карбонатних бетонів вищий,

ніж для звичайних цементних бетонів (приблизно 0,22 замість 0,18).

Із коефіцієнтом Пуассона і модулем пружності бетону пов'язаний *модуль зсуву*:

$$J = \frac{E_b}{2(1 + \mu)}, \quad (3.12)$$

Тріщиностійкість бетону в дорожньому покритті в значній мірі визначається його усадочними деформаціями.

Схематично протікання у часі усадки і набрякання бетону при його висиханні і зволоженні за Р.Лермітом представлено на рис.3.5.

Тверднення бетону супроводжується контракційною і вологісною *усадкою*.

Контракція є наслідком реакцій хімічної взаємодії мінералів цементу з водою, в результаті яких утворюються гідрати, абсолютні об'єми яких менші ніж сумарні об'єми безводних мінералів і води, яка необхідна для гідратації. Контракція пояснюється ущільненням хімічно зв'язаної води, а також води в тонких адсорбційних шарах. Контракція залежить від мінералогічного складу та ступеня гідратації цементу. Контракція веде до збільшення пористості і практично не відображається на об'ємі бетону. Контракційна усадка бетону в 5...10 разів менша вологісної, яка пов'язана з його висиханням.

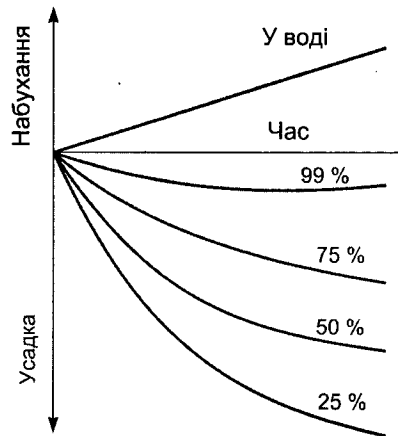


Рис.3.5. Набухання і усадка цементних зразків при їх твердненні у воді та в повітряному середовищі з різною відносною вологістю ($W=25\ldots99\%$)

3. Дорожні бетони

Найбільша усадка (*пластична усадка*) відбувається в перший період тверднення бетону до закінчення тужавлення цементу і визначається В/Ц і температурним фактором (рис.3.6).

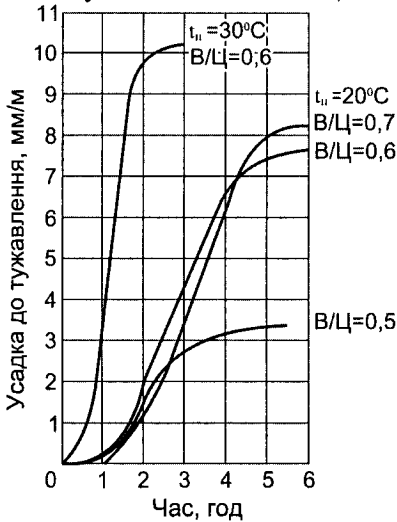


Рис.3.6 Вплив температури повітря (t_n) і В/Ц бетону на усадку до тужавлення (швидкість вітру 20 км/год)

Зменшення об'єму бетону в процесі його висихання обумовлено, насамперед, дією капілярних сил, що виникають у цементному камені при випаровуванні води з капілярів і видаленні міжкристалічної води, а також адсорбційно – зв'язаної води з тоберморитового гелю. Механізм об'ємних змін цементного каменю залежить від вологості середовища. При низькій вологості середовища капілярні сили стають незначними й усадка викликається випаровуванням міжкристалічної води, а при подальшому сушінні й адсорбційно зв'язаної води гелю.

Усадка супроводжується видаленням вологи з капілярних пор $r < 10^{-7}$ м. Зменшення об'єму вологого цементного каменю викликається дією капілярного тиску P , який залежить від поверхневого натягу води, що змочує (σ_{12}), і радіуса капілярів (r):

$$P = 2\sigma_{12} / r. \quad (3.13)$$

Капілярний тиск зростає зі зменшенням відносної вологості повітря і модуля пружності цементного каменю.

Капілярна усадка цементного каменю може описуватися рівнянням:

$$\varepsilon_y^k = \frac{2\sigma_{12}}{r} \omega \frac{1}{E_{ц.к}}, \quad (3.14)$$

де ω - площа змочених пор в одиниці площі елемента; $E_{ц.к}$ – модуль пружності цементного каменю при стиску.

Поряд з дією капілярних сил, що виникають у цементному камені при випаровуванні води з капілярів радіусом менше 10^{-7} м, усадці сприяє видалення адсорбційно зв'язаної води на поверхнях кристалів гідросилікатів кальцію; остання обумовлює зближення субмікросталів, прояв між ними ван-дер-вальсових сил і виникнення водневих зв'язків.

Усадочні деформації викликають у бетоні внутрішні напруження особливо значні при нерівномірному висиханні конструкцій і роботі їх у стиснутих умовах. Вони можуть бути причиною розривів у контактній зоні і розчинової частини бетонів, і викликати особливо в сполученні з температурними напруженнями появу тріщин. Усадочні напруження несприятливо впливають на морозостійкість, непроникність, ряд інших властивостей бетону.

О.Е. Десов, припускаючи, що зразки деформуються при усадці рівномірно по перерізу, запропонував *модуль тріщиноутворення* цементного каменю, обумовлений усадочними напруженнями:

$$T = f_{ct} / \varepsilon_{yc}, \quad (3.15)$$

де f_{ct} – міцність зразків на розтяг; ε_{yc} – величина усадочних деформацій до моменту появи тріщин.

Ним також встановлено, що тріщиноутворення цементного каменю характерно при T менше 3,5 МПа, тріщини від усадки утворюються в цементному камені при абсолютних значеннях усадки від 40 до 150 мкм/м.

Усадку бетону ε_{yc} залежно від об'єму заповнювача можна знайти із виразу:

$$\varepsilon_{yc} = \varepsilon_{yc}^u (1 - V_{зап})^n, \quad (3.16)$$

де ε_{yc}^u – усадка цементного каменю; $V_{зап}$ – об'ємна частка заповнювача.

Загальна усадка цементного каменю зазвичай становить від 3 до 5 мм/м, у бетоні вона коливається в основному від 0,2 до 0,4 мм/м.

У табл.3.5 за даними О.Є. Шейкіна наведені значення усадки бетону (через 6 міс. випробувань), отримані на зразках з

3. Дорожні бетони

різними водоцементними відношеннями і відношеннями заповнювачів і цементу за масою.

Поряд із заповнювачами стримуючий вплив на усадочні деформації бетону здійснює арматура. Величина усадочних деформацій і ступінь армування пов'язані певною нелінійною залежністю.

Таблиця 3.5

Вплив В/Ц і заповнювачів на усадку бетону

Співвідношення заповнювачів і цементу за масою $\left(\frac{П + Щ}{Ц}\right)$	$\epsilon_{yc} \cdot 10^{-4}$ при В/Ц			
	0,4	0,5	0,6	0,7
3	8	12	-	-
4	5,5	8,5	10,5	-
5	4	6	7,5	8,5
6	3	4	5,5	6,5
7	2	3	4	5

Крім технологічних заходів щодо зменшення усадки бетону (зменшення водовмісту і В/Ц, вмісту цементу, застосування чистих заповнювачів оптимальної гранулометрії та ін.) важливе практичне значення має правильний догляд за бетоном, який спрямований на запобігання випаровування з нього вологи в початковий період тверднення.

Для дорожнього бетону, враховуючи умови його експлуатації важливе значення має *витривалість*, тобто здатність зберігати міцність при багаторазовому повторюванні навантаження і виникнення мікротріщин в бетоні задовго до руйнування, що має т.зв. втомлюванісний характер. Цей процес протікає більш інтенсивно, ніж у випадку статичного навантаження.

Безпечне напруження, при якому бетон може сприймати багаторазово повторюване навантаження протягом практично необмеженого часу, називається *границею втомлюваності* σ_b . Величина *відносної границі витривалості* K_b ($K_b = \sigma_b / f_{cm}$) залежить від структури бетону, виду й особливостей вихідних матеріалів, умов тверднення, віку бетону та числа циклів навантаження (рис.3.7). Так, за даними І.М. Грушко залежно від виду

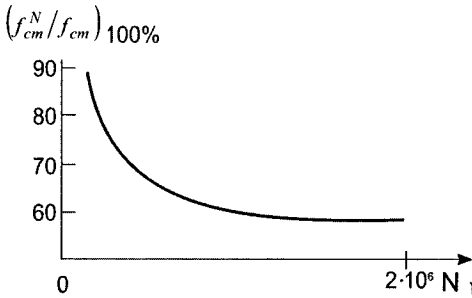


Рис.3.7 Характер залежності відносної межі витривалості бетону від кількості циклів навантаження N :

f_{cm}^N, f_{cm} - відповідно міцність бетону через N циклів і початкова міцність

заповнювачів через 1 млн. циклів K_B коливається від 0,7 до 0,38. Відносна границя (коефіцієнт) витривалості практично лінійно пов'язана з відношенням міцності на розтяг або згин і стиск.

При $\sigma > \sigma_B$ розвивається нестійке деформування і бетон руйнується. При $\sigma \leq \sigma_B$ відбувається зміцнення

бетону в результаті активації фізико-хімічних процесів структуроутворення і перерозподілу напружень між його структурними елементами.

За даними І.М.Грушко між максимальним напруженням і $\lg N$ при пульсуючому навантаженні (N – число циклів навантаження) існує лінійна залежність. Число циклів навантаження до руйнування можна знайти за емпіричною формулою:

$$N = N_0 e^{-(\sigma - \sigma_B) \lg \varphi}, \quad (3.17)$$

де N_0 і $\lg \varphi$ - коефіцієнти.

Границя втомлюваності бетону максимальна при оптимальному водоцементному відношенні, яка зазвичай знаходиться у межах 0,4...0,5. На міцність бетону при втомленні сприятливо впливають добавки ПАР, електроліти, як правило, знижують σ_B .

Підвищення витрати цементу в бетоні до певної межі, застосування цементу з підвищеним вмістом алюмоферитів кальцію також сприяє підвищеній витривалості бетону. Знижує витривалість бетону пропарювання, застосування в якості прискорювача тверднення хлориду кальцію.

3. Дорожні бетони

Багаторазове навантаження підрозділяють на навантаження з несиметричним циклом, коли в бетоні виникають напруження одного знаку (або стиск, або розтяг) і на навантаження із симетричним циклом, коли до бетонного зразка прикладається навантаження різних знаків. Найбільш часто зустрічаються навантаження з несиметричними циклами зі зміною в часі по синусоїдальному циклі.

Пульсуючі й вібраційні навантаження, що впливають на дорожні покриття, носять динамічний характер, оскільки час зміни навантаження від мінімальних до максимальних значень може мати надзвичайно коротку тривалість.

Динамічна міцність бетону особливо чутлива до наявності дефектів і мікротріщин у бетоні і насамперед у контактній зоні. Зі збільшенням дефектності структури бетону по мірі підвищення В/Ц динамічна міцність бетону знижується більш помітно, ніж знижується його статична міцність.

Довговічність бетонних покриттів доріг і аеродромів значною мірою обумовлена *морозостійкістю бетону*. Морозостійкість дорожнього бетону встановлюють залежно від кліматичних умов по середньомісячній температурі найбільш холодного місяця в році. Для України вона коливається зазвичай, від 0 до -10°C (табл. 3.6).

Таблиця 3.6

Морозостійкість бетону для цементобетонних покриттів і основ

Середньомісячна температура повітря найбільш холодного місяця, $^{\circ}\text{C}$	Марка за морозостійкістю бетону	
	у покритті при відтаванні у 5%-ному розчині NaCl	для основи при відтаванні у воді
Від 0 до мінус 5	F100	F25
Від мінус 5 до мінус 10	F150	F50

Водоцементне відношення для бетону дорожнього й аеродромного одношарових і верхнього шару двошарових покриттів повинно бути передусім за умови забезпечення достатньої морозостійкості не більше 0,50, а для нижнього шару двошарових покриттів – не більше 0,60.

Негативний ефект на довговічність бетону циклічної зміни температури підсилюється додатковим впливом розчинів солей. Практика застосування солей (NaCl , CaCl_2 та ін.) для видалення льоду з дорожніх покриттів набула широкого поширення. У результаті танення льоду при посипанні солі на поверхню бетону поглинається велика кількість теплоти (334 кДж/кг) і температура різко знижується. На поверхні бетону фіксується зниження температури приблизно на 9°C протягом 1 хв. (рис.3.8) (“температурний шок”), що викликає появу розтягувальних напружень. Дифузія солі в бетон призводить до появи градієнта її концентрації, що також викликає підвищені напруження, лущення і відшаровування поверхневого шару.

При наявності солей збільшуються осмотичні явища в заморожуваному бетоні, підвищується в'язкість рідкої фази. В результаті зростає величина гідравлічного тиску і прискорюється руйнування бетону.

При поперемінному за-морожуванні і відтаванні насичених

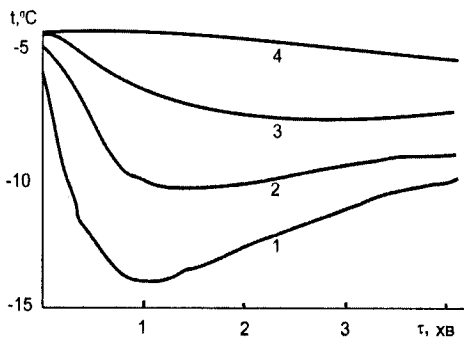


Рис.3.8. Зміна температури поверхневих шарів при нанесенні солі:

Температура: 1 – на поверхні; 2, 3, 4 – відповідно на глибині 1, 10, 50 мм

водою залізобетонних конструкцій порушується відповідність температурних деформацій сталі і бетону, в результаті виникають значні внутрішні напруження і зменшується міцність зчеплення сталі з бетоном. Розтягувальні напруження в арматурі при заморожуванні насичених водою залізобетонних конструкцій можуть досягати 120...150 МПа.

На довговічність бетону, який працює на розтяг і згин в умовах заморожування і відтавання, впливає ступінь навантаження. При напруженнях, що становлять 0,45 призмової міцності, вже помітно прискорюються деструктивні процеси в заморожуваному бетоні, а при напруженнях рівних 0,6...0,8 призмової міцності

3. Дорожні бетони

відзначені випадки руйнування бетону через кілька циклів заморожування.

При заморожуванні вологого залізобетону прискорюється тріщиноутворення в розтягнутій зоні і збільшуються розміри тріщин. При цьому найбільш інтенсивне підвищення вологості бетону спостерігається в розтягнутій зоні конструкцій. Це пояснюється переносом вологи з менш зруйнованої стислої в розтягнуту зону, що активно руйнується, у результаті різного тиску пари переохолодженої адсорбованої води в дрібних порах і кристалічного льоду у крупних порах і тріщинах.

При застосуванні солей проти обледеніння спостерігається більш високий ступінь насичення бетону водою. Так, вологість бетону, що містить насичений розчин NaCl, однакова з вологістю звичайного бетону при відносній вологості повітря $\phi = 100\%$ досягається вже при $\phi = 77\%$, що суттєво прискорює морозне руйнування.

Морозостійкість дорожнього бетону забезпечується застосуванням відповідних вихідних матеріалів, повітровтягувальних і пластифікуючих добавок, правильним призначенням складів бетонної суміші з необхідними обмеженнями витрати води і водоцементного відношення, а також достатнім ущільненням бетону і доглядом за ним. Одним з основних способів досягнення досить високої морозостійкості дорожнього також як і інших видів бетону є введення необхідної кількості втягнутого повітря. Бетони марки за морозостійкістю F100 і вище для дорожніх і аеродромних покриттів варто виготовляти з обов'язковим застосуванням повітровтягувальних або газоутворювальних добавок.

Об'єм втягнутого повітря рекомендується в межах: для бетону одношарових і верхнього шару двошарових покриттів 5...7, для бетону нижнього шару двошарових покриттів 3...5.

Дорожні цементні бетони з необхідними експлуатаційними властивостями і високою довговічністю виготовляють із застосуванням відповідних цементів, заповнювачів і добавок.

Цемент у бетоні для дорожніх і аеродромних покриттів повинен протистояти дії різноманітних агресивних факторів, що створюють досить важкі умови його експлуатації. У зв'язку з цим у клінкері обмежують вміст найбільш "вразливого" мінералу – трикальцієвого алюмінату (C_3A) у кількості не більше 8%. Вміст у

портландцементі доменного гранульованих шлаків повинен бути не більше 15%, інші мінеральні добавки не застосовуються. Питома поверхня портландцементу з добавкою шлаків повинна бути не менше 2800 см²/г. До складу цементу або безпосередньо бетонних сумішей ефективно введення пластифікуючих і гідрофобізуючих добавок.

Для бетонів дорожніх покриттів доріг і аеродромів застосовують портландцемент марок М400 і М500. Початок тужавлення портландцементу повинен наступати не раніше 2 год. від початку замішування, за узгодженням із споживачем допускаються й інші строки тужавлення.

Для бетону дорожніх основ допускається застосування шлакопортландцементу.

Заповнювачі для виробництва дорожніх бетонів повинні відповідати загальним вимогам до заповнювачів для важких бетонів і ряду додаткових умов. Зокрема, вміст пилоподібних і глинистих частинок у щебені з осадових порід не повинен перевищувати:

- для одношарових і верхнього шару двошарових покриттів доріг – 2%
- для нижнього шару двошарових покриттів і основ удосконалених капітальних покриттів доріг – 3%.

Марки щебеню, гравію і щебеню із гравію повинні бути не нижчі зазначених у табл.3.7.

Таблиця 3.7

Марки крупного заповнювача для дорожніх бетонів за міцністю

Призначення бетону	Марка крупного заповнювача за міцністю, не нижче	
	Щебінь	
	з вивержених і метаморфічних порід	з осадових порід
Одношарові покриття і верхній шар двошарових покриттів	1200	800
Нижній шар двошарових покриттів	800	600

Щебінь і гравій, крім марок за міцністю, зазначених у табл. 3.7, повинні мати марки за зношуванням у поличному барабані не нижче зазначених у табл.3.8.

**Марки крупного заповнювача для дорожніх бетонів
за стиранистю**

Призначення бетону	Марка за стиранистю в поличному барабані, не нижче		
	Щебені		Гравій, щебені із гравію
	з вивержених порід	з осадових порід	
Одношарові покриття і верхній шар двошарових покриттів доріг	Ст-I	Ст-II	Ст-II
Нижній шар двошарових покриттів доріг	Ст-III	Ст-III	Ст-III
Основи вдосконалених капітальних покриттів доріг	Ст-III	Ст-IV	Ст-IV

Вміст у крупних заповнювачах зерен пластинчастої (лещадної) і голчастої форми для бетону одношарових і верхнього шару двошарових покриттів не повинен перевищувати 25% за масою.

Морозостійкість щебеню і гравію повинна бути не нижча вимог, зазначених у табл.3.9.

Поряд із природним кварцовим піском у дорожніх бетонах застосовують пісок із відсівів подрібнення. При застосуванні такого піску пред'являються вимоги до марки за міцністю вихідних порід. Вона повинна бути не менше 800, для осадових порід може бути не менше 400, якщо пісок застосовують для нижнього шару двошарових покриттів, а також основ.

Забезпечення заданих у проєкті нормативних характеристик дорожнього бетону досягається проєктуванням необхідного складу бетонної суміші, вибором технологічних режимів при її виготовленні, транспортуванні й ущільненні, а також догляді за бетоном.

На якість ущільнення бетонної суміші суттєвий вплив здійснює легкоукладальність бетонної суміші, яка вибирається з урахуванням прийнятого способу й обладнання для бетонування (табл.3.9).

Марки крупного заповнювача для дорожніх бетонів
за морозостійкістю

Призначення бетону	Марка за морозостійкістю щебеню і гравію для бетону, який експлуатується в районах із середньомісячною температурою найбільш холодного місяця	
	Від 0 до -5 °С	нижче -5°С
Одношарові покриття і верхній шар двошарових покриттів доріг	F50	F100
Нижній шар двошарових покриттів доріг	F25	F50
Основа вдосконалених капітальних покриттів доріг	F15	F25

Для будівництва дорожніх основ і покриттів на ділянках, де використання бетоноукладальних машин неможливо або недоцільно через їх малу площу, утруднені умови будівництва застосовують *лті* бетонні суміші, що самоущільнюються.

Добавки пластифікаторів і суперпластифікаторів можуть вводитися як у заводських умовах, так і безпосередньо в бетонну суміш до бетонування. Застосовують також різні комплексні добавки для досягнення поряд з високим водоредукуючим ефектом достатнього повітровтягування, забезпечення необхідної рухомості з урахуванням часу транспортування та ін. Так, високий пластифікуючий ефект при забезпеченні нормованого об'єму втягнутого повітря забезпечують комплексні добавки нафталін-формальдегідного суперпластифікатора С-3 і повітровтягувальної добавки СНП (смоли нейтралізованої повітровтягуючої). Рекомендований час транспортування бетонної суміші з комплексними добавками вказаного типу становить 60 хв, час від моменту її приготування до застосування – 120 хв.

Рекомендована легкоукладальність бетонної суміші

Обладнання для ущільнення бетонної суміші	Рухомість, см, не більше	Жорсткість, с, не менше
Бетоноукладач на колісно-рейковому ході	1...3	8...10
Бетоноукладач із ковзним опалубленням при швидкості руху, м/хв		
2 і менше	1...3	8...10
від 2 до 2,5	2...4	5...8
від 2,5 до 3,0	3...5	3...5
Майданчиковий вібратор і віброрейки	3...5	3...5
Вібраційні котки та інше аналогічне устаткування	-	40...100

Тривалість перемішування компонентів бетонної суміші після введення води замішування і хімічних добавок становить не менше 1 хв в змішувачах примусової дії і не менше 2 хв у змішувачах гравітаційного типу. Як правило, рухомість бетонної суміші з добавками типу С-3 + СНП зменшується протягом 30...60 хв на 1...4 см, а об'єм втягнутого повітря на 1...3% залежно від конкретних умов будівництва.

Дозування добавки-суперпластифікатора типу С-3 встановлюється в інтервалі 0,5...1 % від маси цементу і залежить від легкоукладальності бетонної суміші, витрати цементу та ін. Рекомендований вміст повітровтягувальної добавки типу СНП знаходиться в межах 0,005...0,03% і визначається експериментально. Вміст повітря, окрім вмісту добавки, суттєво залежить від складу бетонної суміші (рис.3.9).

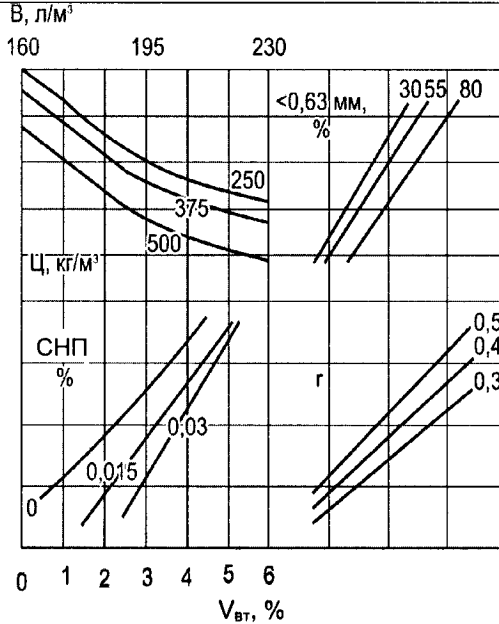


Рис.3.9. Номограма для визначення об'єму втягнутого повітря $V_{вт}$ добавкою СНП залежно від факторів складу бетонної суміші ($г$ -частка піску в суміші заповнювачів; V і $Ц$ – витрата води і цементу, $кг/м^3$; СНП – витрата повітрявтягувальної добавки, % маси цементу)

На ділянках доріг із тривалими підйомами, на зупинках суспільного транспорту, у зонах інтенсивного гальмування, а також в умовах стиснених строків будівництва і при підвищених вимогах до експлуатаційних показників доріг рекомендується використовувати бетонні суміші, армовані металевими фібрами.

Основні характеристики дорожніх литих бетонів із добавками сталеві фібри наведені в табл.3.11.

До складу бетонних сумішей поряд зі звичайними заповнювачами можуть уводитися продукти переробки використаного бетону та залізобетону.

Необхідні показники легкоукладальності бетонна суміш повинна мати на місці бетонування. В умовах дорожнього будівництва важливо враховувати інтервал у часі між

3. Дорожні бетони

приготуванням суміші і її укладанням, час перемішування, температуру, відносну вологість повітря в період транспортування й укладання.

Таблиця 3.11
Характеристики дорожніх фібробетонів

Міцність на стиск, МПа	Міцність на розтяг при згині, МПа		Модуль пружності, МПа, не більше	Мінімальна марка за морозостійкістю в сольових розчинах	Конструкції доріг, тротуарів, площадок
	без фібри	з металевою фіброю			
40	5,0	6,1	40000	200	Покриття швидкісних доріг, магістральних вулиць
35	4,5	5,0	35000	200	Вулиці і дороги місцевого значення, проїзди, автостоянки
30	4,0	5,5	29000	200	Покриття і основи тротуарів, відмосток, площадок
20	3,0	5,0	24000	100	Основи дорожніх конструкцій

За формулою В.М. Пунагіна рухомість бетонних сумішей у часі змінюється згідно формули:

$$S_{k\tau} = S_{k_0} (1 - k\tau), \quad (3.18)$$

де S_{k_0} – осадка конуса бетонної суміші, визначена безпосередньо

після перемішування суміші ($\tau = 0$); S_{k_t} – осадка конуса бетонної суміші через час τ після замісу, год; k – коефіцієнт відносної зміни рухомості суміші, що залежить від температури навколишнього повітря.

Для бетонів на основі портландцементу:

$$k = t/32, \quad (3.19)$$

де t – середня температура повітря за час τ .

Залежність (3.18) не враховує особливостей матеріалів, виду добавок, а також справедлива лише при $k > 1$.

На зміну рухомості в часі впливають всі фактори, що визначають швидкість гідратації цементу.

Підвищення температури бетонної суміші, особливо вище 30°C , призводить до суттєвого збільшення темпу падіння рухомості. При підвищенні температури бетонної суміші на кожні 5°C у діапазоні $20...35^\circ\text{C}$ водопотреба, яка необхідна для забезпечення сталої легкоукладальності, зростає на $2...4\%$. При збільшенні рухомості суміші підвищення водопотреби з ростом температури зростає.

Рекомендована тривалість транспортування бетонної суміші для будівництва автомобільних доріг не перевищує 30 хв при температурі повітря від 20 до 30°C і 60 хв при температурі повітря нижче 20°C .

Ефективним способом забезпечення тверднення бетону при від'ємних температурах є введення хімічних добавок – електролітів (табл.3.12).

При введенні хімічних добавок, які знижують точку замерзання рідкої фази, гідратація і тепловиділення цементу відбуваються при більш низьких від'ємних температурах, що широко використовується у практиці зимового бетонування. Додавання, наприклад, безводного хлориду кальцію в кількості $1...7\%$ води замішування знижує температуру замерзання на $0,4...3,4^\circ\text{C}$.

**Зростання міцності бетону на портландцементі
з протиморозними добавками**

Добавка	Температура тверднення бетону, °С	Міцність при стиску, % марочної, при твердненні на морозі, діб			
		7	14	28	90
НН, ННК	-5	30	50	70	90
	-10	20	35	55	70
	-15	10	25	35	50
ХК+ХН	-5	35	65	80	100
	-10	25	35	45	70
	-15	15	25	35	50
	-20	10	15	20	40
НКС, НК+С, ННК+С	-5	35	50	80	100
	-10	20	35	60	80
	-15	15	25	35	60
	-20	10	20	30	50
ХК+НН	-5	40	60	90	105
	-10	25	40	65	90
	-15	20	35	45	70
	-20	15	30	40	60
	-25	10	15	25	40
ННХК, ННХК+С	-5	50	70	95	105
	-10	30	45	70	90
	-15	20	35	45	70
	-20	15	30	40	60
	-25	10	15	25	40
Поташ	-5	50	65	75	100
	-10	30	50	70	90
	-15	25	40	65	80
	-20	20	35	55	70
	-25	15	30	50	60

Примітка: Протиморозні добавки: ХН- хлорид натрію; ХК- хлорид кальцію; НН- нітрит натрію; ННК- нітрит-нітрат кальцію; С- сечовина; НК- нітрит кальцію; НКС- нітрат кальцію із сечовиною; ННХК- нітрит-нітрат-хлорид кальцію.

Бетони із протиморозними добавками застосовують за умови набору ними критичної міцності до замерзання не менше 5 МПа, а при підвищених вимогах до морозостійкості й

водонепроникності – не менше 50% проектної міцності. Концентрація добавок, які розчинюють у воді замішування, вибирається залежно від середньої розрахункової температури тверднення. Вона може коливатися для різних добавок від 3 до 10% і більше від маси цементу.

При виборі добавок ураховують їх корозійну активність по відношенню до арматури. Добавки хлоридів не допускається застосовувати для залізобетонних конструкцій.

Композиція хлоридів із нітритом натрію дає можливість розширити їх область застосування, однак комплексні добавки, що містять хлор не можна застосовувати для попередньо напружених конструкцій, а також залізобетонних конструкцій із ненапруженою арматурою з діаметром менше 5 мм, і таких, що мають випуски арматури або закладні деталі. Добавка нітриту натрію, яка володіє антифризною дією, одночасно є інгібітором корозії арматури і її можна застосовувати практично без обмежень у залізобетонних конструкціях (не застосовують цю добавку лише в тих випадках, коли в заповнювачах є включення реакційноздатного кремнезему). Разом з тим, при використанні кристалічного нітриту натрію варто враховувати його пожежну небезпеку і отруйність.

Із розрахунково-експериментальних методів проектування складу дорожніх бетонів найпоширеніший *метод СоюзДорНДІ*. Цей метод дає можливість при заданому вмісті втягнутого повітря визначити склад бетонної суміші з необхідною рухомістю чи жорсткістю, що забезпечує проектну міцність на розтяг при згині.

Бетонна суміш поряд з необхідною легкоукладальністю повинна мати хорошу *легкооброблюваність*, що дає можливість отримати достатньо рівну поверхню при прийнятих значеннях рухомості чи жорсткості. З цією метою у складі бетонної суміші підвищують вміст розчинової складової, що також сприяє забезпеченню достатньої однорідності, нерозшаровуваності суміші під час транспортування, її високій повітроутримувальній здатності створенню стійких крайок і бічних граней після проходження бетоноукладача.

При підборі складу дорожнього бетону визначення показників рухомості і жорсткості суміші, об'єму повітря, а також виготовлення контрольних зразків виконується не раніше 30 хв і не пізніше 60 хв після приготування бетонної суміші.

3. Дорожні бетони

Необхідне орієнтовне Ц/В розраховують за формулою (3.20). При заданому об'ємі повітря для визначення Ц/В можна використовувати формулу:

$$\text{Ц/В} = \frac{f_{\text{ctb}}}{0,39R_{\text{ц,з}}(1 - 0,025V_{\text{в,п}})} + 0,1, \quad (3.20)$$

де f_{ctb} – необхідна міцність бетону на розтяг при згині, МПа; $R_{\text{ц,з}}$ – міцність цементу при згині, МПа; $V_{\text{в,п}}$ – необхідний об'єм втягнутого повітря, %.

При нормуванні міцності бетону за класами необхідну міцність бетону в проектному віці обчислюють за формулою:

$$f_{\text{ctb}} = KB_{\text{вtb}}, \quad (3.21)$$

де $B_{\text{вtb}}$ – клас бетону за міцністю на розтяг при згині; K – коефіцієнт необхідної міцності, прийнятий залежно від середнього коефіцієнта варіації міцності V_c за проаналізований період:

при $V_c = 6\%$ і менше $K=1,07$; 7% – $1,08$; 8% – $1,09$; 9% – $1,11$; 10% – $1,04$; 11% – $1,18$; 12% – $1,23$; 13% – $1,28$; 14% – $1,33$; 15% – $1,38$; 16% – $1,43$.

До нагромадження необхідного при статистичному контролі числа результатів випробувань необхідну міцність визначають за формулою:

$$f_{\text{ctb}} = 1,1 \frac{B_{\text{вtb}}}{0,78}. \quad (3.22)$$

Вміст води призначають за відомими графічними або табличними даними (рис.2.31, табл.2.48). У дорожньому бетоні рекомендується за рахунок застосування пластифікуючих і повітровтягувальних добавок, збагачення заповнювачів, застосування укрупнювальних добавок до піску забезпечувати водовміст не більше 165...170 л.

Вміст цементу (Ц), крупного заповнювача (КЗ) і піску (П) визначається за відомими формулами:

$$\text{Ц} = \text{В} \cdot \text{Ц/В}, \quad (3.23)$$

$$\text{КЗ} = \frac{1000}{\frac{\alpha P_{\text{к.з}}}{\rho_{\text{к.з}}^0} + \frac{1}{\rho_{\text{к.з}}}}, \quad (3.24)$$

$$\Pi = \left[1000 - \left(\frac{Ц}{\rho_{ц}} + V + \frac{К.З}{\rho_{к.з}} + V_{в} \right) \rho_{п} \right], \quad (3.25)$$

де $\rho_{к.з}$ – пустотність крупного заповнювача ($\rho_{к.з} = 1 - \frac{\rho_{к.з}^0}{\rho_{к.з}}$, де $\rho_{к.з}^0$ – насипна густина крупного заповнювача); $\rho_{к.з}$, $\rho_{п}$, $\rho_{ц}$ – густина крупного заповнювача, піску і цементу, кг/л; $V_{в}$ – об'єм повітря; α – коефіцієнт розсунення крупного заповнювача цементно-піщаним розчином.

При проектуванні складів дорожнього бетону за умови забезпечення необхідної легкооброблюваності, зв'язності, повітряутримувальної здатності бетонної суміші передбачаються більш високі значення α , ніж при розрахунках складів звичайного важкого бетону (для останнього зазвичай $\alpha \leq 1,5$). Мінімальне значення α для дорожнього бетону рекомендується приймати: 1,7 – для дрібних пісків з модулем крупності (M_k) від 1,5 до 2; 1,8 – для середніх пісків із M_k від 2 до 2,5; 1,9 – 2,0 для крупних пісків із $M_k > 2,5$.

Максимально можливе значення коефіцієнта розсунення рекомендується уточнювати експериментально на пробних замісах шляхом побудови графіка осадки конуса чи показника жорсткості бетонної суміші при однаковому В/Ц і водовмісті від α . Максимальне значення α відповідає такому його значенню на графіку при якому показники рухомості (жорсткості) бетонної суміші ще істотно не змінюються. Максимальне значення α не повинно перевищувати мінімальне більше ніж на 0,2...0,3.

Після розрахунку склад бетону уточнюють експериментально і перераховують на робочий, враховуючи фактичну вологість заповнювачів.

У дорожньому будівництві застосовують дві схеми виробництва бетонної суміші:

1. Дозування цементу і заповнювачів виконують на заводах сухих сумішей, а завершальну операцію – перемішування із додаванням води замішування здійснюють безпосередньо на місці укладання бетону чи поблизу.

2. Приготування бетонної суміші здійснюється на центральному або притрасовому бетонному заводі з подальшим її транспортуванням на будівельний об'єкт.

Основна перевага першої схеми полягає в тому, що якість бетону при її застосуванні не залежить від дальності місця укладання і погодно-кліматичних умов. Для приготування бетонної суміші за даною схемою використовують автобетонозмішувачі. Після змішування віддозованих сухих компонентів із водою, бетонна суміш подається в прийомний бункер або безпосередньо на місце укладання бетону. Дорожньо-будівельні роботи за допомогою сухих сумішей можуть виконуватися також за допомогою бетонозмішувачів, що переміщуються на гусеничному ході в потоці з іншими бетоноукладальними машинами.

Застосування центральних бетонних заводів нераціонально при швидкісних темпах будівництва доріг за допомогою таких високопродуктивних машин як бетоноукладачі з ковзними формами. В цих умовах виникає необхідність у частих передислокаціях заводів, що пов'язано з відповідними витратами. Більш ефективне застосування пересувних притрасових бетонних заводів, що мають мобільне транспортно-складське встаткування, і бетонозмішувальні установки, які швидко монтуються.

Улаштування бетонного покриття включає розподіл, ущільнення бетонної суміші й обробку поверхні бетону. В сучасному дорожньому будівництві зазначені операції здійснюються із застосуванням спеціальних самохідних машин. Їх підрозділяють на рейкові та безрейкові. Перші переміщуються вздовж траси дороги по металевим рейкам-формам, які служать одночасно опалубкою для бетону. Більш ефективні безрейкові машини, що переміщуються вздовж полотна дороги, що будується, на гусеничному ході. Такі машини відрізняються більшою продуктивністю, вони не вимагають трудомістких робіт по установці та демонтажу рейок-форм.

Для дорожніх бетонних покриттів особливо велике значення має *догляд за бетоном*, враховуючи вплив температури та вологості середовища на формування його властивостей у процесі тверднення. Тривалість догляду за бетоном повинна забезпечувати досягнення проектних показників його якості та складає не менше одного місяця.

При знижених і підвищених температурах повітря для покращення умов тверднення бетону в покритті влаштовують термозахисні шари найчастіше з піску товщиною близько 5 см. Шар піску може бути використаний не лише для термо-, але і для вологозахисту бетону. В першому випадку його наносять поверх плівкоутворювального матеріалу відразу після формування плівки, у другому - шар піску достатньо зволожують і підтримують у такому стані протягом усього періоду догляду.

Захист бетону в дорожньому покритті від висихання в початковий період тверднення виконується різними методами. Попередній захист бетону здійснюється із застосуванням рулонних та інших матеріалів, що видаляють безпосередньо перед засипанням піску. Порівняно тривалий захист відкритої поверхні бетонного покриття досягається за допомогою рідких плівкоутворювальних матеріалів. Їх наносять спочатку шляхом розпилення на поверхню свіжевкладеного бетонного покриття після завершення операції обробки. Другий розлив виконують після утворення щільної плівки через 20...60 хв. Розповсюдження набули пігментовані плівкоутворювальні рідини типу ПМ (помароль), лак етиноль, бітумні емульсії та ін. Для освітлення бітумної емульсії застосовують емульсію алюмінієвої пудри чи вапняний розчин. Загальна витрата плівкоутворювального матеріалу, достатнього для захисту бетону від висихання, становить не менше 400 г/м^2 при температурі повітря нижче 25°C і 600 г/м^2 при температурі 25°C і вище. В останні роки в дорожньому будівництві для захисту поверхні свіжевкладеного бетону набула застосування полімерна піна. Вона пригтовляється безпосередньо на місці будівництва в піногенераторі і складається з полімерного в'язучого, вспінювально-отверджувального реагенту і пластифікатора. Для створення сприятливого режиму тверднення бетону шар піни на бетонній поверхні повинен бути 2...4 см.

3.3. Різновиди цементних дорожніх бетонів

При будівництві доріг і аеродромів залежно від їх конструктивних особливостей, вимог до покриттів і основ, можливих для застосування вихідних матеріалів і технологій

3. Дорожні бетони

проведення робіт застосовують поряд зі звичайним важким дорожнім цементним бетоном й інші його різновиди.

Піщані та малощобеневі бетони. У дорожньому будівництві найпоширеніші цементні бетони із крупністю заповнювача до 40 мм, які застосовують для влаштування як покриттів, так і основ автомобільних доріг і аеродромів (середньозернисті бетони).

Піщані бетони для будівництва покриттів і основ автомобільних доріг можуть бути ефективні в районах, де крупний заповнювач – щебінь або гравій є привізним і дорогим матеріалом. Вони мають ряд переваг перед звичайним важким бетоном – більшу однорідність, більш високе відношення міцності на розтяг при згині до міцності на стиск, більшу тріщиностійкість. Разом з тим, висока питома поверхня піщаного заповнювача в бетоні обумовлює підвищену витрату цементу, яка необхідна для заповнення міжзернових пор і створення достатньої обмазки цементного тіста. Зниження витрати цементу досягається вибором оптимального гранулометричного складу заповнювача, введенням активних мінеральних добавок і мікронаповнювачів, застосуванням суперпластифікаторів і ефективних способів ущільнення. Залежно від виду добавок змінюється їх оптимальний вміст у бетоні (рис.3.10).

f_{ct}^{28} , МПа

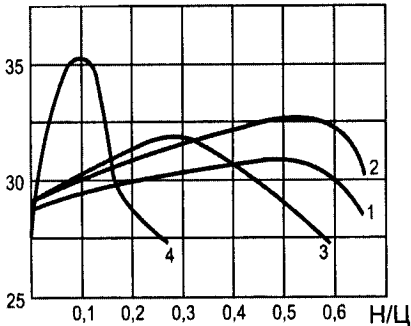


Рис.3.10. Залежність міцності піщаного бетону від ступеня наповнення мінеральними добавками (витрата цементу 430 кг/м³, $C/V=2,0$), наповнювач(Н): 1 – зола Ладижинської ТЕС; 2 – мелений шлак; 3– зола Бурштинської ТЕС; 4 – мікрокремнезем

Залежність міцності піщаного бетону від C/V за Ю.М.Баженовим можна представити у вигляді емпіричної формули:

$$f_{cm} = AR_{II} \left(\frac{Ц}{B + V_{вн}} - 0,8 \right), \quad (3.26)$$

де А– коефіцієнт: для матеріалів високої якості А=0,8, середньої – 0,75 і низької – 0,65; V_{вн} – об'єм втягнутого повітря.

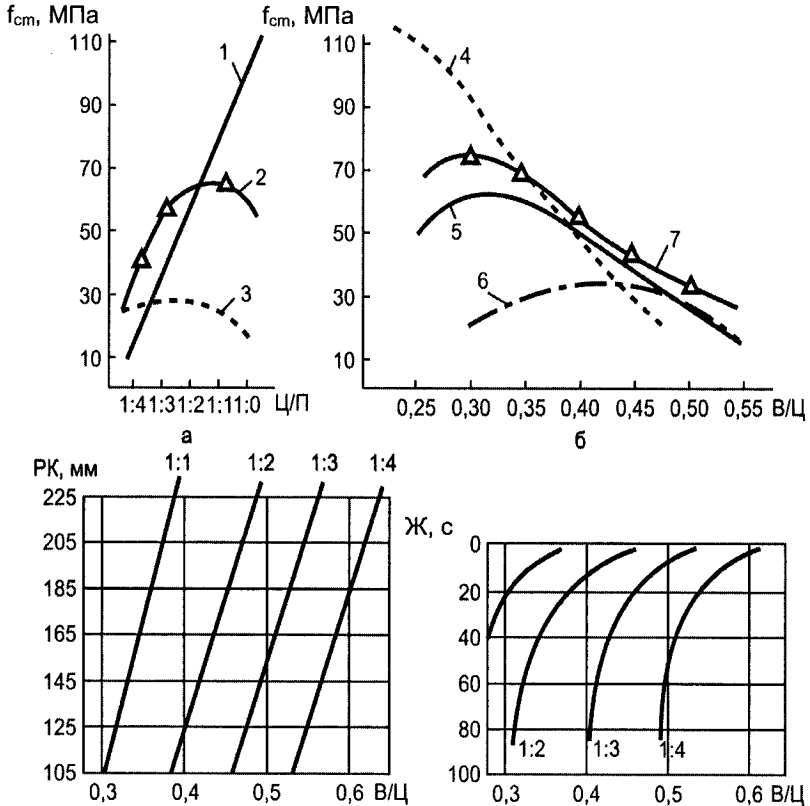


Рис. 3.12 Графіки для вибору співвідношення між цементом і піском середньої крупності (водопотреба 7%), яка забезпечує задані значення розпливу конуса (РК) і легкоукладальності (Ж) цементно-піщаних сумішей (за Ю.М.Баженовим)

Для кожного складу піщаного бетону є оптимальне значення В/Ц, при якому забезпечуються найвищі значення

3. Дорожні бетони

міцності і густини (рис.3.11 б). Найбільша міцність досягається також при оптимальному співвідношенні між цементом і піском (Ц:П) (рис.3.11 а). Для такого співвідношення характерна найбільша густина бетонної суміші. При зменшенні Ц:П нижче оптимальних значень знижується легкоукладальність дрібнозернистих бетонних сумішей (рис.3.12), що ускладнює їх укладання, при збільшенні – зростає кількість надлишкової води в бетоні, що також призводить до зниження міцності.

Особливістю дрібнозернистих у тому числі і піщаних бетонних сумішей є підвищене повітровтягування. Апроксимація даних В.П. Сизова дає можливість для розрахунку об'єму втягнутого повітря запропонувати вирази:

$$\begin{aligned} V_{зп} &= 19,9 - 6,52 \ln(\text{ОК} + 1), \\ V_{зп} &= 24,95 \ln(\text{Ж} + 1) - 8,3, \end{aligned} \quad (3.27)$$

де ОК і Ж – відповідно осадка конуса і жорсткість бетонної суміші.

Для сумішей, легкоукладальність яких не можна визначити звичайними методами (дуже жорсткі чи напівсухі (сипучі) суміші), а також для бетонних сумішей, які ущільнюються силовими способами, об'єм залишкового повітря залежить від параметрів і особливостей конкретного способу ущільнення. Наприклад, для сипучих бетонних сумішей, які ущільнюються вібропресуванням кількість залишкового повітря можна знайти по рис.3.13.

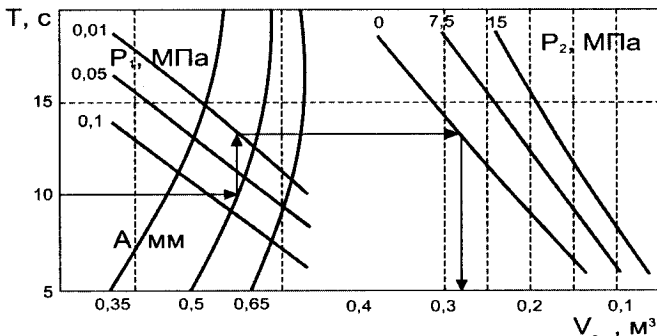


Рис.3.13. Номограма для визначення об'єму залишкового повітря ($V_{з.п}$) у вібропресованому дрібнозернистому бетоні

- A – амплітуда вібрування; T – тривалість вібрування;
- P₁ – величина динамічного привантаження;
- P₂ – тиск пресування

Численні експериментальні дані показують, що на міцність піщаного бетону при стиску, окрім Ц/В, активності цементу і якості заповнювача, впливає багато інших факторів, таких як легкоукладальність суміші, умови тверднення бетону, наявність і кількість активних мінеральних добавок і т.д. Поряд із цим значний вплив на властивості піщаного бетону чинить також і спосіб ущільнення суміші.

Якість заповнювача позначається на основних властивостях піщаних бетонів у більшій мірі, ніж для звичайних важких бетонів. Заміна в піщаному бетоні крупного піску дрібним може зменшувати міцність на 25...30% і більше. Як при оптимальних В/Ц, так і при однаковій легкоукладальності суміші при застосуванні піску середньої крупності найбільш економічні склади, що забезпечують мінімальне відношення витрати цементу до міцності бетону, досягаються при Ц:П=1:2...1:3. При переході на дрібнозернисті піски оптимальними є склади 1:1...1:1,5.

При заданому В/Ц співвідношення між піском певної водопотреби і цементом (П:Ц=n) однозначно визначається показником легкоукладальності суміші (рис.3.12).

Рухомість піщаних бетонів вимірюють трьома методами: за осадкою стандартного конуса, глибиною занурення т.зв. еталонного конуса і розпливом конуса на струшуючому столику. Показники, вимірювання зазначеними методами взаємозалежні (табл.3.13). Цементно-піщана суміш, що має однакову осадку конуса порівняно зі звичайною бетонною сумішшю, ущільнюється краще і швидше.

Таблиця 3.13

Рухомість дрібнозернистих бетонних сумішей,
визначена різними методами

Осадка стандартного конуса, см	Глибина занурення еталонного конуса, см	Розплив конуса на струшуючому столику, мм
1...3	2...3	110... 140
3...6	3...5	140... 170
5...8	4...6	160... 180
8...14	6...8	170... 200
12...15	7...9	190... 220
15...22	8...11	210... 240
20...25	10...14	230... 270

Відомі значення V/Π і n на основі рівняння матеріального балансу (суми абсолютних об'ємів) дають можливість легко знайти витрати всіх компонентів дрібнозернистої бетонної суміші:

$$\Pi = \frac{1 - V_{\text{вп}}}{1/\rho_{\text{ц}} + V/\Pi + n/\rho_{\text{п}}}, \quad (3.28)$$

$$V = \Pi \cdot V/\Pi, \quad (3.29)$$

$$\Pi = n\Pi. \quad (3.30)$$

У наведених формулах $V_{\text{вп}}$ – об'єм втягнутого повітря; $\rho_{\text{ц}}$ і $\rho_{\text{п}}$ – густина цементу і піску в кг/м^3 .

Витрату піску в піщаних бетонних сумішах можна розраховувати також на основі уявлень про заповнення цементним тістом об'єму пор між зернами піску з врахуванням їх необхідного розсунення. У цьому випадку витрату піску можна знайти рішенням системи рівнянь:

$$\frac{\Pi}{\rho_{\text{ц}}} + \frac{\Pi}{\rho_{\text{п}}} + V + V_{\text{вп}} = 1, \quad (3.31)$$

$$\frac{\Pi}{\rho_{\text{ц}}} + V = \alpha_{\text{ц.т}} P_{\text{п}} \frac{\Pi}{\rho_{\text{п.г}}}. \quad (3.32)$$

де $\rho_{\text{п.п}}$ – насипна густина піску, кг/м^3 ; $P_{\text{п}}$ – пустотність піску; $\alpha_{\text{ц.т}}$ – коефіцієнт заповнення порожнин і розсунення зерен піску цементним тістом.

Звідки:

$$\Pi = \frac{\rho_{\text{п}} \rho_{\text{п.п}} (1 - V_{\text{вп}})}{\rho_{\text{п.г}} + \alpha_{\text{ц.т}} P_{\text{п}}}. \quad (3.33)$$

За експериментальним даними В.П. Сизова коефіцієнт $\alpha_{\text{ц.т}}$ залежить від показників легкоукладальності піщаних бетонних сумішей, величини Π/V , модуля крупності піску та нормальної густоти цементного тіста.

Для піщаних бетонів з активних мінеральних добавок найбільше практичне значення мають кам'яновугільні золи ТЕС, особливо в комплексі з добавками суперпластифікаторів. Введення в бетонну суміш золи, на відміну від інших активних мінеральних добавок, зазвичай не погіршує, а в ряді випадків покращує

легкоукладальність. Уже першими дослідниками було встановлено, що залежність рухомості бетонної суміші від вмісту в суміші золи має екстремальний характер і оптимальний вміст її повинен бути не більше 30% маси цементу. На пластифікуючий ефект золи впливає форма, стан поверхні частинок, їх дисперсність. Легкоукладальність бетонної суміші покращується при введенні золи за рахунок скловидної поверхні її частинок, які зменшують внутрішнє тертя і знижують в'язкість. Ряд дослідників вважають, що кулеподібні частинки золи можуть розглядатися як тверді "шарикопідшипники" у суміші, аналогічно тому, як пухирці емульгированого повітря при використанні повітровтягувальних добавок виконують пластифікуючу дію на бетонну суміш і є своєрідними повітряними "шарикопідшипниками". Більші фракції золи містять більшу кількість незгорілих вуглецевих частинок, що мають підвищене водопоглинання, і частинок неправильної форми. Тому водопотреба бетонних сумішей при використанні золи підвищеної дисперсності суттєво знижується.

Підвищення дисперсності золи і зниження її водопотреби може бути досягнуто шляхом відбору із останніх полів електрофільтрів чи помелом, що руйнує органо-мінеральні агрегати, які входять до її складу.

Бетонні суміші з оптимальною добавкою золи мають досить високу "життєздатність" і придатні для транспортування.

Вплив золи на міцність піщаного також як і інших видів бетону залежить від її властивостей і дисперсності, вмісту і хіміко-мінералогічного складу цементу, віку й умов обробки бетону.

Особливості структури позначаються на деформативних властивостях піщаних бетонів. Вони мають модуль пружності на 20...30% нижчий ніж у звичайного бетону, більш високі значення усадки і повзучості. Деформативність і повзучість можуть бути значно знижені за рахунок підвищення жорсткості бетонних сумішей, застосування силових методів ущільнення.

Освоєно різні технології отримання піщаних бетонів і виробів на їх основі з покращеними властивостями, які включають домел цементу, спільний домел цементу з піском, застосування віброзмішувачів і струминевих змішувачів, використання методів інтенсивного ущільнення – віброштампування, вібропресування, напівсухого пресування, роликового формування і т.д. Покращення

3. Дорожні бетони

фізико-механічних властивостей піщаних бетонів досягається при частковій або повній заміні піску гранульованими доменними шлаками, що мають високе зчеплення із цементним каменем. Розроблено технологію високоміцного дрібнозернистого шлакобетону із густиною 1800...2300кг/м³.

В якості заповнювача для піщаного дорожнього бетону рекомендуються природні кварцові або кварцово-полевошпатові піски, які відповідають вимогам діючих стандартів і характеризуються модулем крупності та повним залишком на ситі №063 для покриттів і основ не менше відповідно 2,5 і 50%; 2,0 і 30%. При техніко-економічному обґрунтуванні допускається застосування для покриттів середніх пісків, а для основ - дрібних. В якості укрупнюючої добавки можуть застосовуватися подрібнені піски фракції 1,25...5 мм марки 800 і вище для покриттів і не нижче 400 для основ.

Обов'язковими умовами, що забезпечують необхідну якість дорожнього піщаного бетону, є введення в суміш добавок ПАР⁴ приготування в змішувачах примусової дії.

До *малощобенових бетонів* відносяться бетони з коефіцієнтом розсунення зерен щебеню розчином більше 1,7...1,9. За технологічними властивостями і техніко-економічними показниками найбільш ефективні малощобенові бетони із вмістом щебеню 800...900 кг/м³ (коефіцієнт розсунення близько 2,5...2,8). За своєю структурою і складом малощобенові бетони займають проміжне положення між звичайними та піщаними бетонами.

Для малощобенових бетонів характерні: підвищена седиментаційна стійкість, висока водоутримувальна здатність бетонних сумішей, підвищена стійкість крайок і бічних граней свіжовідформованої бетонної плити після проходження ковзної опалубки. У порівнянні зі звичайними бетонами однаковими за міцністю при стиску вони мають підвищену міцність при розтягу і розтягу при згині.

Разом з тим для малощобенових бетонів характерні підвищена усадка і повзучість. Вони характеризуються підвищеною витратою цементу в порівнянні зі звичайними важкими бетонами. Також як і для піщаних бетонів зменшення витрати цементу і покращення усього комплексу технічних властивостей для малощобенових бетонів досягається

застосуванням активних мінеральних добавок, добавок ПАР та інших модифікуючих добавок.

Карбонатні та легкі бетони. До *карбонатних* відносяться бетони із застосуванням заповнювачів із карбонатних порід. Такі заповнювачі виконують активну структуроутворюючу роль у бетоні, зміцнюючи контактну зону цементний камінь-заповнювач. Це зміцнення відбувається в результаті високого адгезійного зчеплення між заповнювачем і цементним каменем внаслідок високої фізико-хімічної активності карбонатних гірських порід-вапняків і доломітів. Дані бетони застосовують переважно для будівництва основ під капітальні вдосконалені покриття.

Для карбонатних бетонів встановлюють класи:

- на розтяг при згині – 1,6,;2,0 ;2,4 і 2,8
- на стиск – 7,5 і 12.

Жорсткість бетонної суміші на карбонатних заповнювачах при влаштуванні основ повинна характеризуватися на місці вкладання стандартним показником 10...15 с.

В якості дрібного заповнювача карбонатних бетонів застосовують пісок, отриманий в результаті подрібнення або просіювання щебеню з карбонатних порід. Вміст у піску зерен, що проходять через сито №014, допускають до 40% за масою. У піску не повинно бути грудок глини, суглинків та інших забруднювальних домішок. У крупному заповнювачі обмежується вміст зерен слабких порід – не більше 20% за масою.

Для будівництва доріг і аеродромів можуть застосовуватися також *легкі бетони* на пористих заповнювачах. Такі бетони доцільно використовувати в районах, де відсутні місцеві кам'яні матеріали. Різновидом керамзиту, який характеризується підвищеною середньою густиною і високою міцністю є *керамдор* (керамзит дорожній). Основні якісні показники керамдору наведені нижче:

- густина зерен, кг/м³ – 1,8...2,3
- насипна густина, кг/м³ – 850...1300
- водопоглинання, % – не більше 5
- міцність при стиску в циліндрі, МПа – до 9...10
- дробимість (втрати маси при стиску в циліндрі), % не

більше 10...15

3. Дорожні бетони

- стираність, % не більше 25...30
- марка за морозостійкістю F100...F300
- коефіцієнт розм'якшення 0,9.

Керамдор залежно від крупності зерен підрозділяється на фракції 20...40, 10...20 і 5...10. Зерна керамдору менші 5 мм можуть бути отримані шляхом подрібнення крупних гранул.

Вимоги до керамдору залежно від застосування бетонів у дорожньому покритті наведені в табл.3.14.

Таблиця 3.14

Вимоги до керамдору

Застосування керамдору	Марки	Дробимість, % не більше	Зношування, %, не більше	Морозостійкість, цикли, не менше
Одношарове покриття і нижній шар двошарового покриття	I – II	20	35	150
Нижній шар двошарового покриття	I – II	25	45	50
Основа вдосконалених покриттів	I - III	30	55	50

Високоміцні керамзитобетони класів B25...B40 успішно використовується при будівництві аеродромних покриттів, автодорожніх мостів, збірних плит для автомобільних доріг. Для них поряд з високою міцністю характерні також висока морозостійкість і тріщиностійкість.

Бетони із жорстких бетонних сумішей і литі бетони.

Бетони із жорстких бетонних сумішей укладаються із застосуванням самохідних котків. Їх застосовують, переважно, в умовах міського будівництва. Є також досвід влаштування доріг із даних бетонів для руху транспортних засобів із великим осьовим навантаженням. Залежно від границі міцності при стиску і розтягу при згині такі бетони підрозділяють на чотири марки (табл.3.15).

Марки бетонів, що ущільнюються самохідними котками

Марки	Границя міцності, МПа		Призначення
	на стиск	на розтяг при згині	
1	7,5	1,0	Для тротуарів
2	10	1,6	Для вулиць і доріг загальноміського і районного значення (у тому числі швидкісних доріг магістральних вулиць)
3	20	2,4	
4	30	3,2	Для двостадійного будівництва вулиць і доріг у районах масової житлової забудови

Морозостійкість бетонів, що ущільнюються за допомогою котків повинна бути не нижче F50 для марки 1 і не нижче F100 для марок 2,3,4.

Ці бетони приготують переважно на портландцементі марки 400. Витрати цементу для приготування бетонної суміші наведені в табл.3.16.

Таблиця 3.16

Витрата цементу в бетонах на основі жорстких сумішей

Марка цементу	Витрата цементу, кг/м ³			
	марки бетону			
	1	2	3	4
300	80...90	110... 120	-	-
400	70...80	90... 100	230... 250	250... 300
500	-	-	200... 225	225... 250

Вміст води в бетонній суміші призначається з умови отримання стандартного показника жорсткості 20...40 с і становить 6...7% від маси сухих компонентів. Для покращення фізико-механічних властивостей цих бетонів у суміш із водою замішування рекомендується вводити бітумну емульсію в кількості 30...40 % від маси цементу. Застосовують також повітрявтягувальні й інші добавки. Ефективно введення добавки золи-виносу при співвідношенні цемент: зола = 3:1. Вимоги до заповнювачів для цих бетонів практично такі ж як і для звичайних важких бетонів. В якості крупного заповнювача використовують зазвичай щебінь із

3. Дорожні бетони

максимальною крупністю 20 мм. Допускається також застосування заповнювача із зернами до 40 мм, однак поверхня дорожнього покриття при використанні такого заповнювача гірше оброблюється, можливе розшарування суміші.

Для ущільнення бетонної суміші використовують переважно самохідні вібраційні катки з пневматичними провідними вальцями. Найбільша товщина ущільненого шару становить 30...35 см. При застосуванні самохідних котків на пневматичних шинах, товщина ущільненого шару зменшується до 15...25 см.

До *литих* відносять бетони, виготовлені з сумішей із рухомістю за осадкою конуса 20 см і більше. Ефективність їх застосування в дорожньому будівництві обумовлена мінімізацією витрат на ущільнення. Відмінними рисами технології будівництва з литих сумішей є необхідність попередньої установки опалубки або бортових каменів, відсутність розподіляючих механізмів та ін. Литу бетонну суміш для дорожнього покриття отримують зазвичай із малорухомої суміші, в яку перед її укладанням вводять добавку суперпластифікатора. Литі бетонні суміші застосовуються при будівництві монолітних основ і покриттів з нахилами, які не перевищують 3%. Вони не поступаються звичайним бетонам за міцністю, деформативністю та морозостійкістю.

Нормативні характеристики дорожніх бетонів із литих сумішей наведені в табл.3.17.

Таблиця 3.17

Характеристики дорожніх бетонів з литих сумішей

Конструкція доріг і тротуарів	Міцність на стиск	Міцність на розтяг при згині	Модуль пружності, МПа	Мінімальні марки за морозостійкістю
Покриття швидкісних доріг і магістральних вулиць	40	5,0	40000	F200
Вулиці і дороги місцевого значення	35	4,5	35000	F200
Тротуари, вимощення, площадки	20	3,0	24000	F100
Основи дорожніх конструкцій	30	4,0	29000	F200

Впровадження в будівництво ефективних суперпластифікаторів дозволяє отримати *самоущільнювальні бетони*. Розплив стандартного конуса бетонних сумішей для таких бетонів становить не менше 60 см. Вони ущільнюються під дією власної маси.

Для підвищення зв'язності і запобігання водовідділення литих та самоущільнювальних бетонних сумішей у загальному об'ємі заповнювачів збільшують кількість дрібних фракцій до 24...35% загальної маси заповнювача.

Важливим є також використання цементів, які мають достатню водоутримуючу здатність. Дієвим прийомом запобігання водовідділенню є введення водоутримуючих мінеральних добавок у т.ч. і золи-виносу.

Застосування литих і самоущільнювальних бетонних сумішей дозволяє при різкому обмеженні або повному виключенню віброущільнення суттєво покращити екологічні умови проведення бетонних робіт, підвищити їх продуктивність (збільшити швидкість укладки бетону, значно знизити їх трудомісткість, збільшити темпи будівництва). При високій рухомості і стійкості до розшарування сумішей забезпечується однорідність, низька пористість і покращення фізико-механічних характеристик бетону (міцність, морозостійкість, водонепроникність та ін.) більш високу якість поверхні дорожніх покриттів.

Полімерцементні бетони. Високі адгезійні властивості, підвищений опір на розтяг при згині, корозійна стійкість, стійкість до ударних впливів і ряд інших покращених властивостей полімерцементних бетонів обумовлюють доцільність їх застосування в дорожніх і аеродромних покриттях. Для отримання дорожніх дрібнозернистих і піщаних полімерцементних бетонів найбільший ефект має використання епоксидних полімерів у кількості 3...8% від маси цементу. Міцність на розтяг при згині бетонів при цьому збільшується на 50...80 % і досягає до 7 МПа. Незалежно від міцності на розтяг при згині міцність полімерцементних бетонів на стиск повинна бути не нижче 30 МПа. Модуль пружності бетонів знижується до 25...30·10³ МПа (замість 28...38·10³ МПа в звичайних бетонах із однаковою міцністю).

3. Дорожні бетони

Коефіцієнт лінійного температурного розширення і усадка полімерцементних бетонів аналогічні показникам звичайних бетонів, корозійна стійкість при попереминому заморожуванні і відтаванні в розчинах хлористих солей більш ніж в 2 рази вища, стираність у 2...2,5 рази менша.

Полімерцементний бетон рекомендується застосовувати для влаштування верхніх шарів дорожніх і аеродромних покриттів, підсилення існуючих покриттів, відновлення окремих ділянок поверхні, кутів і окрайок, швів цементобетонних покриттів.

Для приготування полімерної добавки в цементних бетонах ефективні епоксидні смоли ЕД-20 та ін. Для їх тверднення у водному середовищі до епоксидних смол додають поліетиленполіамін – 10 % і фуриловий спирт – 20 %. Епоксидну смолу вводять у бетонну суміш у вигляді водної емульсії, фуриловий спирт і поліетиленполіамін у вигляді водних розчинів. Витрату епоксидного полімеру при проектуванні складів бетону вибирають залежно від необхідних значень міцності бетону на розтяг при згині – f_{ct}^{28} та інших властивостей (рис.3.14).



Рис.3.14. Графік для визначення витрати епоксидного полімеру в полімерцементних бетонах

Значення В/Ц бетонної суміші при однаковій рухомості залежать від витрати епоксидного полімеру:

Витрата полімеру в суміші, % маси цементу	В/Ц
3...4	0,4
5...6	0,38...0,39
7	0,37...0,38
8	0,34...0,35

Полімерцементні бетонні суміші приготують у змішувачах із примусовим перемішуванням. Час від моменту приготування суміші до моменту її укладання в покриття не повинен перевищувати 1 год. Укладання, ущільнення і обробку полімерцементного бетону виконують за допомогою машин і механізмів, які застосовуються для роботи зі звичайним бетоном. Укладену в покриття суміш покривають рулонним плівковим матеріалом і витримують протягом 48 год. Відкривати рух по покриттю можна через 14 діб.

4. ВИСОКОМІЦНІ БЕТОНИ

Умовна границя між бетонами рядової і високої міцності змінюється в міру розвитку технології бетону. У 50-х роках минулого сторіччя до високоміцних відносили бетони класів В25...В40 (М300...М500), у 60-х вище В50...В60. В даний час до високоміцних бетонів (High Strength Concrete) відносять, звичайно, бетони з міцністю при стиску в 28-добовому віці 70...150 МПа. Євростандарт EN206 передбачає можливість виготовлення і застосування бетонів включаючи клас В115. Завдяки, в першу чергу, застосуванню ефективних модифікаторів (суперпластифікаторів і мікрокремнеземистих добавок), освоєна промислова технологія виробництва бетонів з міцністю, що знаходиться в зазначеному діапазоні, розроблені відповідні норми. Такі бетони все ширше застосовують для несучих конструкцій монолітних каркасів висотних будинків (табл.4.1), мостів, морських платформ, віброгідропресованих труб. В лабораторних умовах отримані бетони міцністю до 200 МПа і вище.

Таблиця 4.1

Приклади застосування високоміцного бетону при
будівництві висотних будинків

Місто	Рік зведення будинку	Кількість поверхів	Міцність бетону, МПа
Монреаль	1984	26	119,6
Торонто	1986	68	93,6
Нью-Йорк	1987	72	57
Торонто	1987	69	70
Париж	1988	36	70
Чікаго	1989	82	78
Гуанджоу, КНР	1989	63	70
Чікаго	1990	65	84
Франкфурт	1990	58	45
Сіетл	1990	58	133
Франкфурт	1991	51	112

До високоміцних бетонів можна віднести і т.зв. *високоякісні бетони (High Performance Concrete)*, що мають міцність на стиск у віці 2 діб - 30...50 МПа, 28 діб – 60...150 МПа, морозостійкість – F600 і більше, водонепроникність – W12 і вище, водопоглинення – менше 1...2%, стираність не більше 0,3...0,4 г/см², регульовані показники деформативності.

Досягнення високої міцності важкого бетону на високоміцних заповнювачах можливе шляхом підвищення щільності і міцності цементного каменю(когезійний фактор) і міцності контактної зони(адгезійний фактор)

Розвиток бетонознавства наприкінці ХХ і на початку ХХІ ст. дозволив визначити основні шляхи отримання високоміцних швидкотверднучих бетонів. Їх можна розташувати у наступному порядку:

1. Застосування високоміцних (ВМЦ), швидкотверднучих (ШТЦ) в'язучих та високоякісних заповнювачів;

2. Зниження В/Ц перш за все за рахунок введення в бетонну суміш ефективних пластифікуючих добавок;

3. Регулювання процесів гідратації і структуроутворення бетону за рахунок комплексу ефективних технологічних рішень.

Високоміцні цемента та заповнювачі. Розроблено чотири основних напрямки отримання ВМЦ і ШТЦ:

- послідовна оптимізація всіх переділів виробництва цементу при суворій регламентації технологічних параметрів;

- Підвищення у складі клінкеру вмісту найбільш активних мінералів , їх легування шляхом введення в сировину суміш спеціальних добавок;

- введення в цемент спеціальних кристалізаційних добавок (затравок);

- синтез змішаних високоактивних цементів

- Для отримання ВМЦ і ШТЦ велике значення має тонкий помел і висока гомогенність сировинної суміші, оптимальний режим випалу клінкеру, правильний підбір виду і зольності палива, різке охолодження клінкеру. Велике значення для активності клінкеру має також його мікрокристалічна

4. Високоміцні бетони

структура. Цемент покращеної якості отримують переважно при чіткій правильній кристалізації аліту, що характерно для так званої монадобластичної структури, яка утворюється при оптимальних умовах випалювання. Рання міцність портландцементу визначається вмістом зерен менше 10 мкм, а більш пізня – до 30 мкм. Для ШТЦ і ВМЦ вміст фракцій цементу розміром менше 30 мкм повинен складати не менше 65...75%, залежно від марки портландцементу він може досягати 80%.

Вперше в Україні на Здолбунівському цементному заводі отримано високоміцні особливо швидкотверднучі цементи (ОШТЦ) за рахунок суттєвого підвищення у клінкерній складовій вмісту трикальцієвого силікату та оптимізації зернового складу цементу.

Рекомендований зерновий склад високоміцних цементів (ВМЦ) і ОШТЦ наведений в табл. 4.2.

Таблиця 4.2

Зерновий склад особливо швидкотверднучих (ОШТЦ) і високоміцних (ВМЦ) цементів

Цемент марки	Питома поверхня, м ² /кг	Вміст частинок, % (розмір частинок в мкм)			
		<5	5-30	30	>60
М600	близько 300	5-12	30-50	30-45	5
ОШТЦ	370-400	20-28	45-70	11-25	6
ВМЦ М700	320-400	15-2-5	45-70	20-35	10
ВМЦ М800	близько 600	15-30	55-75	3-25	1

Дослідження показали, що при підвищенні питомої поверхні цементу з 200 до 600 м²/кг при оптимальному вмісті гіпсу для кожного рівня дисперсності ступінь гідратації та міцність в 1...3 добовому віці зростають, в 28-добовому віці міцність збільшується лише до певної границі, а потім знижується.

Забезпечення необхідного зернового складу ШТЦ і ВМЦ можливе при помелі в млинах, що працюють в замкнутому циклі. При цьому, однак, має місце суттєве (до 40...50%) зниження продуктивності мелючих агрегатів.

У ряді країн розроблені надшвидкотвердіючі цементи, що дають можливість вже через 2...6 год. після замішування досягти міцність при стиску 5...20 МПа, а в 28 діб 70...80 МПа і більше. До таких цементів можна віднести фтормісткий надшвидкотвердіючий портландцемент. В якості сировинних матеріалів для нього використовуються вапняк, шлаки вторинної переплавки алюмінію, фторид кальцію і спеціальна добавка для утримання фтору в клінкері. Цемент, модифікований фтором, досягає через 6 год нормального тверднення міцності на стиск 5...8 МПа. Застосування фтормісткого цементу дає можливість забезпечити при виробництві залізобетонних виробів необхідну розпалубочну міцність вже через 1 год теплової обробки.

Перспективним способом отримання надшвидкотверднучих цементів є введення у склад сировинних сумішей сульфату кальцію в кількості близько 10%. Утворені при випалюванні сульфоалюмінати кальцію надають цементу здатність до швидкого тверднення, високу гідравлічну активність. Сировинним компонентом для виробництва клінкеру такого цементу можуть бути фосфогіпс та інші промислові відходи.

До перспективних видів в'язучих для високоміцних бетонів (рис. 4.1) можна віднести в'язучі низької водопотреби (ВНВ) і тонкомелені багатоконпонентні цементы (ТБЦ). Розвиток теоретичних уявлень про цементы з мінеральними добавками і добавками ПАР. розробка ефективних суперпластифікаторів цементних систем дали можливість запропонувати змішані в'язучі нового покоління, які характеризуються низькою водопотребою і високою міцністю при порівняно низькому масовому співвідношенні клінкерної складової і мінеральних добавок.

В'язучі низької водопотреби (ВНВ) отримують сумісним тонким помелом клінкеру або готового портландцементу і активних мінеральних добавок у присутності порошкоподібного суперпластифікатора. Відмінними особливостями ВНВ є висока дисперсність ($S_{\text{min}}=400...500 \text{ м}^2/\text{кг}$). низька водопотреба (нормальна густина до 18%), висока активність (до 100 МПа і вище).

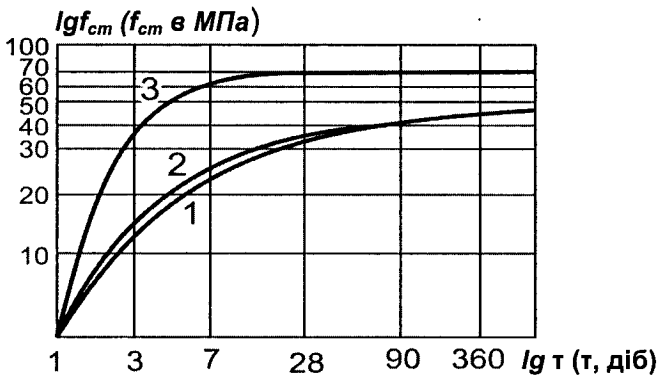


Рис.4.1 Кінетика твердіння бетонів із суперпластифікатором С-3:
1– без добавки; 2– з С-3 при постійному В/Ц; 3– с С-3 з пониженим В/Ц

При тонкому помелі в'язучого має місце механо-хімічна активація, внаслідок якої збільшується число активних центрів і нових вільних валентностей в одиниці об'єму клінкеру і зернах мінерального наповнювача, стає можливим утворення органо-мінеральних комплексів між тонкодисперсними мінералами і молекулами суперпластифікатора. В результаті різко збільшується пластифікуючий ефект добавок, міцність в'язучого зростає на 2...3 марки.

Тонкомелені багатоконпонентні цементи (ТБЦ) – гідралічні в'язучі речовини, отримані сумісним тонким помелом портландцементного клінкеру чи портландцементу й активних або інертних мінеральних добавок. Сумарний масовий вміст добавок у цементах даного виду може складати 20...50% і більше. Оптимальна дисперсність ТБЦ складає в середньому $450 \text{ м}^2/\text{кг}$. Подальше збільшення тонкості помелу з урахуванням різко зростаючих енергозатрат і незначного підвищення міцності в'язучого є недоцільним.

Виробництво тонкомелених багатоконпонентних цементів може бути організоване як на цементних заводах, так і

на підприємствах будіндустрії із застосуванням кульових, струменевих млинів або вібромлинів.

ТБЦ застосовують у бетонних сумішах і розчинах при введенні з водою замішування суперпластифікуючих добавок. При цьому, враховуючи значну кількість мінеральних добавок, вміст суперпластифікаторів відповідно зростає у порівнянні з необхідним для чистоклінкерних портландцементів.

Поряд зі спеціальними високоміцними швидкотверднучими лементами, технологія яких апробована на цементних заводах, але не впроваджена в достатній мірі, враховуючи недостатню потребу в будівельній індустрії для отримання високоміцного бетону, можуть використовуватися цементні загальнобудівельного призначення, що виготовляє цементна промисловість України.

Міцність бетону може бути нижчою або вищою марки цементу. В останньому випадку слід мати на увазі, що при достатньо високих механічних характеристиках заповнювачів та їх адгезійних властивостях міцність бетону визначається міцністю цементного каменю, котра значно вище міцності цементно-піщаного розчину, що характеризує марку цементу.

Основними якісними показниками заповнювачів є їх механічні властивості, зерновий склад та наявність шкідливих домішок.

Для найбільш відповідальних видів бетонів, в тому числі високоміцних при виборі заповнювачів враховується їх густина, пористість та водопоглинання. Для таких бетонів застосовують щебінь або гравій з середньою густиною зерен не нижче $2,5 \text{ г/см}^3$ і водопоглинанням не більше 0,5% для заповнювача з вивержених і метаморфічних порід і 1% - осадових порід. Для менш відповідальних бетонів густина зерен крупного заповнювача повинна бути не нижче $2,3 \text{ г/см}^3$, а водопоглинання не більше 0,8% для заповнювача з вивержених і метаморфічних порід і 2% - осадових порід. Істинна густина порід, які використовуються для заповнювачів важких бетонів, що характеризує їх масу в одиниці об'єму в абсолютно щільному стані, змінюється у вузьких межах і враховується при розрахунках їх пористості і складів бетонних сумішей.

Середня густина гірських порід залежить від їх пористості і змінюється в широких межах. Цей показник для гірських порід певного мінерального складу і структури може служити непрямю характеристикою їх міцності і довговічності. Пористість вивержених порід зазвичай не перевищує 1,5%, осадових особливо карбонатних порід досягає 40%. Для виробництва щебеню, який застосовується у важкому бетоні, використовують карбонатні породи, пористість яких знаходиться зазвичай в діапазоні 5...15%. Відкриту пористість гірських порід характеризує їх водопоглинання. Водопоглинання вивержених порід, що не зазнали процесів вивітрювання, зазвичай не перевищує 0,7%, а у осадових воно досягає 10% і більше.

При приготуванні бетонної суміші крупний заповнювач застосовують у вигляді окремо дозованих фракцій: 5...10 (3...10); 10...20; 20...40; 40...80; 80...120 мм. Допускається також застосування крупних заповнювачів у вигляді суміші суміжних фракцій. Фракція 3...10 мм застосовується в разі використання як дрібного заповнювача пісків з модулем крупності не більше 2,5. При будівництві масивних гідротехнічних споруд допускається застосування щебеню і гравію розміром від 120 до 150 мм і понад 150 мм, що вводяться безпосередньо в блок при укладанні бетонної суміші. Вміст окремих фракцій у крупному заповнювачі в складі бетону встановлюється з умови досягнення його найбільшої щільності і знаходиться в межах, встановлених табл. 4.3.

На якість заповнювачів істотно впливає вміст пилоподібних, глинистих і мулистих домішок, які визначаються зазвичай способом відмулювання. До пилоподібних відносять частинки розміром понад 0,005 до 0,05 мм, до глинистих і мулистих – до 0,005 мм. Обмеження вмісту відмулюючих домішок в заповнювачах обумовлено негативним впливом утворених ними плівок на зчеплення цементного каменю з заповнювачами, і, як наслідок, на міцність, морозостійкість та інші властивості бетону, водопотребу бетонних сумішей.

Таблиця 4.3

Рекомендований склад суміші
фракцій крупного заповнювача

Найбільша крупність заповню- вача, мм	Вміст фракцій у крупному заповнювачі, %				
	від 5 (3) до 10мм	>10до 20 мм	>20 до 40 мм	>40до 80 мм	>80до 120мм
10	100	-	-	-	-
20	25...40	40...75	-	-	-
40	15...25	20...35	40...65	-	-
80	10...20	15...25	20...35	35...55	-
120	5...10	10...20	15...25	20...30	30...40

Для звичайного важкого бетону при встановленні допустимої кількості пилоподібних і глинистих домішок у крупному заповнювачі враховується вид гірської породи: для вивержених і метаморфічних порід в бетонах всіх класів – не більше 1%. осадових порід для бетонів класів С20/25і вище –2%. С16/20 і нижче – 3% за масою.

Морозостійкість крупних заповнювачів для всіх видів важких бетонів не може бути нижче нормованої марки бетону за морозостійкістю. Необхідна морозостійкість щебеню та гравію нормується з урахуванням середньомісячної температури найбільш холодного місяця в році. Якщо остання коливається від 0 до -10° С марка по морозостійкості щебеню і гравію повинна бути не нижче F100, від -10 до -20° С – F200, нижче -20° С – F300.

Для піску, що виконує роль дрібного заповнювача бетону, визначальними якісними ознаками є зерновий склад, вміст пилюватих і глинистих (відмулюючих) частинок і петрографічна характеристика. У разі невідповідності зернового складу природного піску рекомендованим вимогам застосовують коригуючі добавки. Для дрібних і дуже дрібних пісків це може бути укрупнююча добавка – крупний пісок в т.ч. пісок з відсіву дроблення природного каменю. Для крупних пісків при необхідності коригування зернового складу застосовують, навпаки, піски з меншим модулем крупності.

До шкідливих домішок в заповнювачах бетону, що викликають його корозію і погіршення якості поверхні, відносяться: аморфні різновиди діоксиду кремнію, (халцедон, опал, кремій та ін.); сірка, сульфіді, сульфати; магнетит, гідроксиди заліза. Міцність і довговічність бетону зменшують такі домішки в заповнювачах як вугілля, графіт, горючі сланці, апатит, нефелін, фосфорит. Деякі домішки, які містять водорозчинні хлориди, сірку, сульфіді і сульфати, можуть викликати корозію арматури в бетоні.

Шляхи зниження В/Ц. Головною закономірністю, що визначає міцність бетону, є закон (правило) водоцементного відношення.

Вплив В/Ц на міцність бетону відображається у відомих розрахункових залежностях, які були розраховані різними авторами. З них найбільшого поширення набули відомі формули, запропоновані Б.Г. Скрамтаєвим та Ю.М. Баженовим. Відомі також формули, що запропоновані І.М. Ахвердовим, В.Н. Шмигальським та іншими авторами.

Основним напрямком досягнення високої міцності бетону є забезпечення гранично низьких значень водоцементного відношення при достатньо високому ступені гідратації цементу і необхідному ущільненні бетонної суміші. При низьких значеннях В/Ц позитивно впливає на міцність бетону досягнення оптимального співвідношення між вмістом щегену і розчинової складової.

При постійному вмісті заповнювача міцність бетону при зміні В/Ц проходить через екстремальні точки, що відповідають такій структурі матеріалу, при якій мінімізується його пористість. Пористість цементного каменю описується простим рівнянням:

$$P_{цк} = B / Ц - 0,23\alpha \quad (4.1)$$

де α - ступінь гідратації цементу.

При реально досяжних значеннях ступеня гідратації цементу в бетоні $\alpha=0,7...0,8$ мінімальні значення В/Ц цементного каменю в бетоні, при якому об'єм його пор наближається до нуля, дорівнюють 0,16...0,18. Оптимальний

відносний водовміст цементу, що умовно відповідає його повному змочуванню при звичайних умовах (без введення пластифікаторів, пресуючих впливів та інш.), відповідає приблизно $0,876K_{нг}$, де $K_{нг}$ - водоцементне відношення цементного тіста нормальної густоти. По Й.М.Ахвердову при оптимальній вологості цементне тісто характеризується постійними реологічними параметрами – граничним напруженням зсуву ($\tau_0=1040$ Па) і коефіцієнтом в'язкості ($K_v=20$ Па·с), а також має сингулярну точку на кривій електроопору.

Зі збільшенням В/Ц за інших рівних умов не тільки зростає загальна пористість цементного каменю, але й істотно змінюється диференціальна пористість бетону, тобто розподіл пор в одиниці об'єму бетону за їх радіусами. Встановлено, що навіть при невеликому зростанні В/Ц збільшується радіус капілярів.

Традиційними способами зменшення В/Ц при постійній витраті цементу є зниження витрати води і перехід на жорсткі суміші, застосування пластифікуючих добавок, підвищення чистоти заповнювачів, перехід на заповнювачі з меншою питомою поверхнею.

Експериментально встановлено, що для високоміцних бетонів можливе застосування дрібних пісків за умови відсутності в них пилюватих і глинистих домішок. Так, у дослідях М.І.Ситника й О.Л.Каліщука показана можливість одержання бетонів міцністю 80...100 МПа при використанні дрібного дніпровського піску з модулем крупності $M_k=1,54$.

Радикальним способом зменшення В/Ц без істотного погіршення легкоукладальності бетонної суміші є введення добавок суперпластифікаторів(СП). На відміну від звичайних пластифікаторів, що знижують витрату води до 10...15%, СП дозволяють скорочувати витрати води на 20...30% і більше і, відповідно, збільшувати міцність бетонів (рис.4.1, табл. 4.4). Регулюванням кількості СП і В/Ц можуть бути отримані бетони з високою ранньою міцністю. При оптимальній дозі добавки вона може зростати в 2...3 рази.

Таблиця 4.4

Класифікація пластифікаторів бетонних сумішей

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

Суперпластифікатори (СП) почали застосовувати у виробництві бетону на початку 1970-х років. Завдяки їм виявилось можливим істотно покращити властивості бетону без збільшення витрати цементу, одержувати бетони з литих та само ущільнювальних сумішей з ОК > 20 см при помірному вмісті, високоміцні бетони на звичайних портландцементях і заповнювачах з низькою проникністю, високою корозійною стійкістю і т.д.

Введення СП є в даний час обов'язковою умовою виробництва високоякісних, високотехнологічних бетонів типу НРС.

Прийнята в даний час класифікація суперпластифікаторів (табл. 4.5) розділяє їх за складом і механізмом дії.

Таблиця 4.5

Класифікація суперпластифікаторів

Позначення	Склад СП	Механізм дії	Відносна вартість полімеру, %
НФ	На основі сульфованих нафталінформальдегідних поліконденсатів	Електростатичний	40
МФ	На основі сульфованих мелаїноформальдегідних поліконденсатів	Електростатичний	80
ЛСТ	На основі очищених від цукрів лігносульфонатів	Електростатичний	20
П	На основі полікарбоксилатів і поліакрилатів	Стеричний	100

Механізм дії СП обумовлений комплексом фізико-хімічних процесів у системі цементне тісто-добавка. Він визначається головним чином:

1. Адсорбцією моно- або полімолекулярних ПАР на поверхні в основному гідратних новоутворень:

2. Колоїдно-хімічними явищами на межі поділу фаз.

Широко поширений СП "Розріджувач С-3" належить до групи СП нафталінформальдегідного типу (НФ). Його виготовляють як у виді 20...40%-них розчинів, так і порошку.

При дозуванні добавки 0,5...1% маси цементу він дозволяє збільшити рухомість бетонної суміші від 2...4 см до 20...22 см. В умовах рівної рухомості сумішей бетони із СП С-3 в результаті зменшення V/C мають міцність у віці 28 діб на 30...50% вище, ніж бетони без добавки (рис 4.2. При цьому істотно зростають щільність і водонепроникність, покращується ряд інших властивостей бетону.

Добавки СП нового покоління типу П на основі поліакрилатів і полікарбоксилатів забезпечують збільшення осадки конуса бетонної суміші від 3 см до 21...24 см при дозуванні всього 0,2...0,3% від маси цементу. Якщо бетонні суміші з добавками традиційних СП швидко втрачають рухомість, то суміші з добавками полікарбоксилатів знаходяться в пластичному стані 1.5...2 год. Висока здатність до зберігання бетонних сумішей із полікарбоксилатним СП робить їх особливо привабливими для монолітного будівництва і при тривалому транспортуванні. Як і інші СП вони з успіхом застосовуються і при тепловологісній обробці бетону в індустрії збірного залізобетону.

Введення СП дозволяє забезпечити необхідну міцність пропареного бетону при зниженні температури ізоtermічного прогріву або скороченні на 40...50% тривалості тепловологісної обробки за рахунок, головним чином, тривалості ізоtermічного прогріву.

Можливим способом зниження V/C і отримання високоміцних бетонів є зниження водовмісту і перехід до жорстких та наджорстких бетонних сумішей. Застосування силових методів ущільнення, таких як пресування чи

вібропресування використовується у виробництві ряду виробів і дозволяє отримувати бетони підвищеної щільності та міцності.

Зменшення В/Ц в певних межах можливо і за рахунок збільшення витрати цементу, хоча цей шлях має обмежені можливості, з огляду на зростання усадочних деформацій і зниження тріщиностійкості бетону. Високоміцні бетони доцільно виготовляти при витраті цементу не більше 500 кг/м^3 .

При однакових значеннях В/Ц збільшення витрати цементу понад оптимального значення призводить звичайно до зниження міцності. Цей висновок, багаторазово підтверджений дослідниками, можна пояснити необхідністю деякої оптимальної товщини цементного тіста як клейового прошарку на зернах заповнювача, при якому досягається максимальний адгезійний ефект. З цим висновком узгоджуються і рекомендації про доцільність забезпечення в бетонах високої міцності коефіцієнта розсунення зерен крупного заповнювача цементно-піщаним розчином $\alpha \leq 1,2 \dots 1,3$, тобто максимального насичення бетону крупним заповнювачем. В останньому випадку утворюється каркас із зерен щебеню, що створює умови для залучення його в роботу бетону під навантаженням. Характер руйнування бетонів з таким каркасом свідчить про те, що основна маса зерен крупного заповнювача бере участь у сприйнятті руйнуючих зусиль. Зменшенню необхідного об'єму розчинової складової і зменшенню витрати цементу сприяє фракціонування крупного заповнювача і зниження його пористості.

Регулювання процесів гідратації та структуроутворення. У цьому плані важливим є комплекс заходів, що включають регулювання тонкості помелу цементу, введення добавок-прискорювачів, введення високодисперсних мінеральних добавок, що прискорюють структуроутворення, та вплив температури твердіння бетону.

Найбільш універсальним і ефективним способом модифікування структури і регулювання властивостей бетону є введення в бетонну суміш відповідних добавок. В даний час в економічно розвинених країнах майже весь бетон, який випускається, виготовляється із застосуванням різноманітних добавок. Номенклатура відомих добавок надзвичайно

різноманітна. Додавки, як правило, виконують поліфункціональний вплив на бетонні суміші і затверділий бетон.

Є різні класифікації добавок за основним ефектом їхньої дії. Поширена класифікація пропонує виділяти 4 класи добавок-модифікаторів: 1-ий – регулятори реологічних властивостей бетонних сумішей, їхньої здатності до збереження у часі; 2-ий – регулятори тужавлення і твердіння бетонних сумішей, кінетики їхнього тепловиділення; 3-ий – регулятори пористості бетону, що забезпечують його корозійну стійкість, морозостійкість, водонепроникність; 4-ий – що додають бетону спеціальні властивості, (гідрофобні, електропровідні, біоцидні і т.д.).

Інша класифікація добавок за основним технологічним ефектом запропонована Асоціацією стандартизації й випробувань матеріалів (ASTM) (табл. 4.6).

Таблиця 4.6

Класифікація хімічних добавок за ASTM

Тип	Технологічний ефект	Номер стандартів
A	Водозниження	C494
B	Уповільнення твердіння	C494
C	Прискорення твердіння	C494
D	Водозниження / уповільнення твердіння	C494
E	Водозниження / прискорення твердіння	C494
F	Значне водозниження / уповільнення твердіння	C494
	Пластифікування для литого бетону	C1017
	Пластифікування / уповільнення твердіння литого бетону	C1017
	Повітровтягування	C260
	Додавки для торкрет-бетону	CI 141

На даний час досліджена велика група хімічних речовин, які створюють прискорюючу дію на цементний бетон. При виборі добавок враховують багато чинників, їх вплив на збереження бетонних сумішей у часі, твердіння бетону, корозію арматури, схильність до появи висолів та ін.

В європейських нормах (EN 934-2) хімічні добавки пропонується розділяти як в залежності від технологічного ефекту, так і призначення.

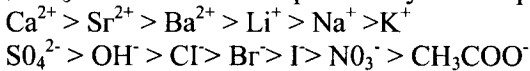
4. Високоміцні бетони

Прагнення до універсалізації дії добавок і підсилення їхнього технічного ефекту зумовили широке поширення комплексних (композиційних) добавок. Комплексні добавки можна розділити на дві категорії. Перші представлені сумішами добавок, що належать до одного класу, а другі - до різних класів.

Всі комплексні поліфункціональні добавки-модифікатори (ПФМ) можна розділити на чотири групи: I - суміші електролітів; II - суміші ПАР; III - суміші електролітів і ПАР; IV - суміші хімічних і мінеральних добавок.

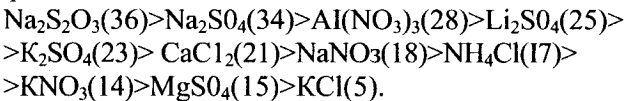
В групу *прискорювачів твердіння* входять, як правило, солі-електроліти. Прискорення твердіння портландцементу викликається в основному прискоренням гідратації алітової фази.

За даними В.С. Рамачандрана, за прискорюючим впливом на гідратацію C_3S катіони й аніони розташовуються в ряди:



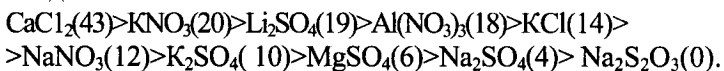
Хімічні добавки-прискорювачі вводять для підвищення ранньої міцності бетону, зменшення витрати цементу, скорочення часу теплової обробки виробів, зниження температури прогрівання і часу попереднього витримування. Ефективність введення прискорювачів твердіння тим вища, чим коротший цикл тепловологісної обробки, нижче марка цементу і клас бетону, температура ізотермічного прогріву.

За даними В.В.Чистякова, Ю.М. Дорошенко і І.Г. Гранковського за ефективністю впливу на міцність цементного каменю після пропарювання добавки можна розташувати в наступний ряд:



В дужках наведене збільшення міцності цементного каменю у відсотках в порівнянні з еталоном.

У віці 28 діб після пропарювання ефективність дії добавок подана так:



Мінеральними добавками прийнято називати тонкодисперсні добавки з мінеральних матеріалів, що вводять в

бетонні суміші в кількості звичайно більше 5% для покращення або надання бетонам спеціальних властивостей. За походженням добавки цього типу бувають як природними, так і техногенними.

В основу класифікації активних мінеральних добавок, прийнятої в європейських країнах і США, покладені їхня активність і хіміко-мінералогічний склад.

До високоактивних мінеральних добавок у бетон, все ширше застосовуваним в останні десятиріччя, відносяться ультрадисперсні відходи виробництва феросплавів, т.зв. *мікрокремнезем (МК)*. Мікрокремнезем являє собою конденсованій аерозоль, що вловлюється фільтрами систем газоочистки плавильних металургійних печей. Він містить частки сферичної форми із середнім діаметром 0,1 мкм і питомою поверхнею 15000...25000 м²/г і вище. Його насипна густина -150...250 кг/м³. За хімічним складом МК складається в основному з некристалічного кремнезему, вміст якого звичайно перевищує 85 і досягає 98%. Мікрокремнезем як добавка в бетони був уперше запропонований на початку 50-х, а почав масово використовуватися з початку 70-х років минулого сторіччя в Норвегії, а потім і інших країнах. Відповідно до норвезьких норм, кількість діоксиду кремнію в МК повинна бути не менше 85%, а дозування добавки в бетон - не вище 10% маси цементу. Унікальна питома поверхня (до 2000 м²/кг) у сполученні з аморфізованою структурою часток, наявністю таких домішок як карбід кремнію, що мають високу поверхневу енергію, обумовлюють високу структуруючу і реакційну здатність цього матеріалу в порівнянні з іншими активними мінеральними добавками. Вміст МК у бетонах рекомендується в кількості 20...50 кг/м³.

Для транспортування МК його піддають гранулюванню або брикетуванню. МК також постачають у вигляді водних паст із використанням стабілізуючих добавок для запобігання в подальшому гелеутворення. В табл.4.7 наведені основні нормовані показники для конденсованого МК, марки якого встановлюються в залежності від вмісту в ньому SiO₂.

Основні нормовані показники для мікрокремнезему

Показник	Норми для марок МК				
	неущільненого		ущільненого		суспензії
	МК-85	МК-65	МКУ-85	МКУ-65	МКС-85
Масова частка SiO ₂ , %, не менше	85	65	85	65	85
Масова частка вільних лугів (Na ₂ O, K ₂ O), %, не більше	2	2	2	2	2
Масова частка оксиду кальцію, %, не більше	3	5	3	5	3
Питома поверхня м ² /г, не менше	12	12	12	12	–
Індекс активності К, %, не менше	95	90	95	90	95
Насипна густина, кг/м ³	150... 250	150... 250	280... 500	280... 500	–

Примітка: Індекс активності К визначають за формулою: $K = f'_{cm} / f''_{cm} \cdot 100$, де f'_{cm} – міцність при стиску зразків розчину з використанням 90% цементу і 10% МК, МПа; f''_{cm} – 100% цементу.

Ефективною відпускнуою формою МК є гранульований продукт – модифікатор, що містить в залежності від марки 7...15% сухого суперпластифікатора.

Підвищення міцності бетону за рахунок введення МК обумовлено комплексом особливих властивостей цього матеріалу і, насамперед, його підвищеною пуцолановою активністю, здатністю поліпшувати мікроструктуру цементного каменю, особливо в контактній зоні з заповнювачами. Введення в бетони МК, враховуючи збільшення при цьому водопотреби суміші, виявляється ефективним у комплексі з добавкою суперпластифікатора. У цьому випадку модифікатор дозволяє збільшити міцність бетону як за рахунок збільшення ступеня гідратації в'язучого, так і зменшення пористості бетону, особливо її капілярної складової. Цементний гель, представлений в основному низькоосновними гідросилікатами типу С-S-H(I), міцність яких практично вдвічі перевищує

міцність гідросилікатів типу С-S-H(II), що утворюються в бетонах без модифікаторів. На збільшення міцності бетону з мікрокремнеземвміщуючими модифікаторами позитивно впливає зменшення водовідділення, посилення адгезійної взаємодії цементного каменю і заповнювачів.

Кінетика твердіння бетонів із МК в нормальних умовах характеризується інтенсивним наростанням міцності в інтервалі від 7 до 28 діб. В умовах тепловологісної обробки при звичайних режимах пропарювання досягається міцність до 90% марочної. Аналіз експериментальних даних показує, що при оптимальному дозуванні суперпластифікатора міцність бетону на стиск у 28-добовому віці досягає 95...100 МПа при витраті в'язучого 400 кг/м³ і вмісті МК 10...15%. При збільшенні витрати в'язучого з 400 до 600 кг/м³ за рахунок зниження водов'язучого відношення до 0,19 вдається підвищити міцність бетону до 135 МПа.

У композиції із суперпластифікатором можуть бути ефективні й інші високодисперсні кремнеземисті й алюмокремнеземні матеріали. У табл.4.8 показаний вплив на фізико-механічні властивості бетону добавки модифікатора, що включає суперпластифікатор і метакаолін.

Таблиця 4.8

Міцнісні і деформативні характеристики бетонів з добавками С-3 і метакаоліну (МК)

В/Ц	Витрата, кг/м ³		Вміст С-3, % в'яз.	Вік бетону, діб	Міцність бетону, МПа, 28 діб			Модуль пружності ·10 ³ , МПа
	ПЦ	МК			на стиск	на розтяг	призмова	
0,40	500	-	0,5	3	28,9	2,9	-	-
				7	40,7	3,87	32,6	31,13
				28	53,6	4,76	43,4	37,73
0,42	475	25	0,55	3	29,3	3,15	-	-
				7	39,5	4,07	32	36,62
				28	56	5,11	47	42,35
0,44	450	50	0,75	3	33,2	3,76	-	-
				7	44,1	4,81	37,5	38,18
				28	63,9	6,2	56,2	44,72
0,38	450	50	1,35	3	48,4	4,85	-	-
				7	65	5,96	56,6	40,15
				28	83,4	6,62	74,2	46,35

Для високоміцних бетонів, що містять, поряд із суперпластифікаторами, високодисперсні кремнеземисті й алюмокремнеземисті добавки, характерна висока стабільність рухомості бетонної суміші в часі і мінімальне водовідділення (рис.4.2).

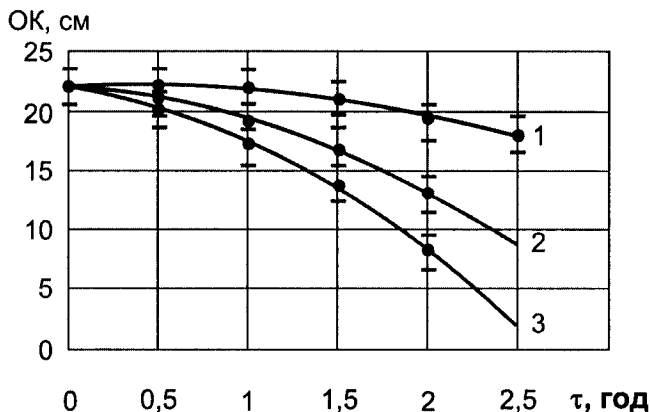


Рис.4.2. Кінетика зміни рухомості бетонних сумішей:
1– С-3 - 0,75%, метаксаолін – 10%; 2– без добавок;
3– суперпластифікатор С-3 – 0,25%

Для високоміцних бетонів з добавками модифікаторів характерні підвищені значення пружних властивостей і верхньої границі мікротріщиноутворення. Деформації усадки можуть бути практично відсутні або мають гранично низькі значення. Повзучість таких бетонів істотно нижче нормованих значень. Бетони характеризуються досить низькою водопроникністю, високою сульфатостійкістю, кислотостійкістю, стійкістю в умовах лужної корозії, викликаною взаємодією лугів з активним кремнеземом заповнювача.

Високоміцні бетони, які отримують при низьких В/Ц що, відповідно, забезпечує низьку пористість бетону, мають високу морозостійкість. Застосування комплексних модифікаторів, що включають суперпластифікатор і мікрокремнеземисту добавку, дозволяє досягти морозостійкості бетону F600...F700 і вище. Додатковий ефект можна досягти введенням до складу модифікатора повітрятвувальних ПАР.

Одним із шляхів покращення структури утворення є зменшення капілярної пористості і покращення властивостей бетону шляхом просочення бетону полімерними речовинами або мономерами з подальшою полімеризацією (отримання *бетонополімерів*).

При просоченні бетону змінюється його структура, у першу чергу радикально зменшується відкрита капілярна пористість, ущільнюється контактна зона цементного каменю з заповнювачами. У результаті зменшується водопоглинання й істотно зростає міцність, поліпшуються інші фізико-механічні властивості.

Пористість щільного бетону коливається в межах 6...20%, об'єм пор діаметром більше 1 мкм може досягати 2...3%. Зниження пористості бетону на 10% підвищує міцність бетону приблизно в 2 рази.

Для практики при розрахунках складів бетону в т. ч. і високоміцних найбільш зручними залишаються формули виду:

$$f_{ct} = AR_c (C/B - b), \quad (1.51)$$

де f_{ct} – необхідна міцність бетону, R_c – стандартна активність цементу, C/B – цементно-водне відношення, A , b – коефіцієнти, що враховують особливості вихідних матеріалів, вік бетону та інші технологічні фактори.

Раніше, Б.Г. Скрамтаєвим і Ю.М. Баженовим було показано, що в широкому діапазоні C/B залежність $f_{ct} = f(C/B)$ можна уявити як кусочно-лінійну функцію з точкою перелому при $C/B = 2,5$ ($B/C = 0,4$) [8]. Як показано дослідженнями, виконаними за останні десятиліття [9; 29], введення в бетонні суміші добавок-суперпластифікаторів дозволяє забезпечити лінійність залежності $f_{ct} = f(C/B)$ в діапазоні C/B від 1 до 4. При цьому формула 1.51 набуває вигляду:

$$f_{ct} = kAR_c (C/B - b), \quad (1.52)$$

де k – коефіцієнт, що залежить від виду добавки і її вмісту.

5. ФІБРОБЕТОНИ

До фібробетонів або дисперсно-армованих бетонів належить група композиційних матеріалів, що включають короткі відрізки різних волокон (фібри) у цементній матриці. В якості фібри можуть служити різні типи волокон зі сталі, скла, синтетичних матеріалів, азбесту, вуглецю та ін.

Дисперсне армування цементного каменю волокнами дозволяє істотно підвищити його питому міцність особливо на розтяг і згин, тріщиностійкість, стійкість до ударних і вібраційних впливів, опір стиранню й ін. Застосування фібробетону дозволяє:

- реалізувати ефективні конструктивні рішення, наприклад, тонкостінні конструкції без стержневої або сітчастої розподільної арматури;
- знизити працемісткість арматурних робіт і підвищити ступінь механізації й автоматизації виробництва армованих конструкцій;
- відкриває можливість застосування нових, більш продуктивних прийомів формування армованих конструкцій, наприклад, пневмонабризк, роликоче формування та ін.

Волокна підвищують несучу здатність матриці. У результаті розходження між значеннями модулів пружності армуючих волокон і матриці здійснюється передача навантаження в контактній зоні через матрицю до волокна.

Теоретичні моделі дисперсно-армованих цементних систем припускають однорідний розподіл дисперсних волокон у матриці. Для композиційних матеріалів з дисперсними волокнами модуль пружності (E) і міцність на розтяг при згині ($f_{\text{сгв}}$) можна орієнтовно розрахувати по формулах:

$$E = K_a E_b V_b + E_m V_m, \quad (5.1)$$

$$f_{\text{сгв}} = K_a R_b V_b + R_m V_m, \quad (5.2)$$

де K_a - коефіцієнт армування бетону, E_b і E_m - модулі пружності відповідно волокна і матриці; R_b і R_m - міцність при розтягу волокна і матриці; V_b і V_m - об'ємний вміст волокон і матриці.

На значення коефіцієнта армування K_a позначаються такі фактори як довжина фібри, її орієнтація, різні дефекти. Для матеріалів з орієнтованими безперервними волокнами $K_a=1$ і руйнування відбувається в результаті розриву волокон, а не їх висмикування. Коефіцієнт армування дорівнює одиниці також, якщо фібри орієнтовані паралельно напрямку прикладеної напруженні. Висмикування або ковзання фібри в контактній зоні відбудеться, якщо фібра буде коротша критичної довжини:

$$l_{кр} = \frac{d_v R_v}{2R_{зс}^k}, \quad (5.3)$$

де d_v - діаметр волокна; $R_{зс}^k$ - міцність контактної зони на зсув.

У більшості випадків фібри не є орієтованими паралельно напрямку прикладеного напруженні й ефект армування неповний. Якщо фібри розташовані перпендикулярно до прикладеного напруженні, то вони практично не підвищують міцність матеріалу. Для фібр цілком неорієтованих у трьох вимірах величина K_a приблизно дорівнює 1/6, у двох – 1/3.

Мінімальний (критичний) об'ємний вміст волокон, при якому вони здатні після розтріскування матриці нести початкове навантаження складає близько 0,3%, 0,4% і 0,75% відповідно для сталевих, скло- і пропіленових волокон.

Типова діаграма напруження-деформація фібробетонів включає три зони (рис.5.1, 5.2):

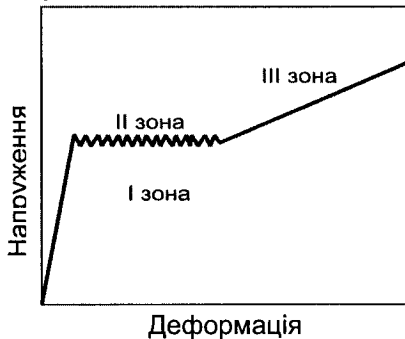


Рис.5.1. Типова крива залежності напруження – деформація для цементних композицій, армованих волокном

I – зона пружної роботи як матриці, так і фібри;

II – зона попереминого переміщення напруження на матрицю і фібри й утворення мікротріщин;

III – зона сприйняття навантаження фібрами.

В III-й зоні повне руйнування матеріалу стримується міцністю зчеплення в контактній зоні або міцністю лише одних фібр.

При руйнуванні фіробетону максимальна робота, що відбувається при розриві, виражається залежністю:

$$W_p = V_v R_v l_{кр} / 12, \quad (5.4)$$

де $l_{кр}$ – критична довжина фібри.

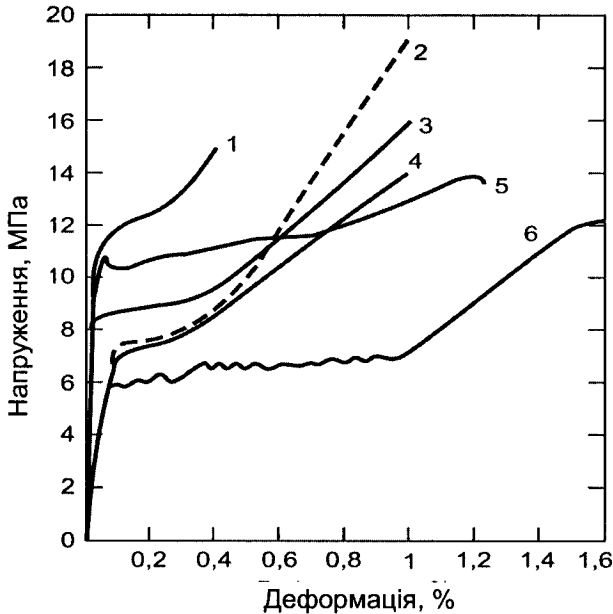


Рис.5.2. Криві залежності напруження – деформація для деяких армованих волокнами цементних композитів:

- 1 – портландцемент – сталевий дріт, 1,5 об.%;
- 2 – те ж, 1 об.%; 3 – високоалюмінатний цемент – скловолокно, 0,067 об.%; 4 – портландцемент – цирконієве скловолокно, 5% за масою; 5 – портландцемент – поліамідне скловолокно, 1,93 об.%; 6 – гіпс – скловолокно, 1 об.%

При $l \leq l_{кр}$ робота розриву визначається енергією, що необхідна для висмикування фібр. При $l > l_{кр}$ матеріал руйнується при розриві фібр і робота розриву обернено пропорційна довжині фібри. Робота розриву пропорційна також діаметрові фібри і збільшення міцності на розрив фібробетонів може бути досягнуто застосуванням джгутів волокон і в такий спосіб збільшенням їх робочого діаметра.

Галузі застосування різних волокон у цементних композитах за даними В.Рамачандрана, Р.Фельдмана і Дж.Бодуена наведені в табл.5.1.

Таблиця 5.1

Застосування різних волокон у виробх з цементу

Тип волокна	Галузь застосування
Скло	Збірні панелі, облицювання стін, каналізаційні труби, тонкі бетонні покриття дахів, суха штукатурка для бетонних блоків
Сталь	Ніздрюваті бетонні елементи покриття, дорожні покриття, мостові настили, вогнетривкі матеріали, бетонні труби, злітно-посадочні смуги аеродромів, ємності високого тиску, вибухостійкі споруди, основи верстатів, портові споруди, облицювання тунелів, конструкції корабельного корпусу
Поліпропілен, нейлон	Фундаментні палі, попередньо напружені палі, лицевальні панелі, плавучі елементи для проходів і причалів у портах, дорожній ремонтний матеріал, привантажі для підвідних труб
Азбест	Листи, полотно, труби, плити, вогнетривкі й ізоляційні матеріали, каналізаційні труби, гофровані і гладкі покрівельні листи, облицювання стін

Тип волокна	Галузь застосування
Вуглецеві	Гофровані елементи перекриттів, одинарні і подвійні вигнуті мембранні структури, корпуси човнів, настили будівельних лісів
Поліамід	Аналогічно вуглецевим волокнам
Бамбук	Будівельні настили
Слюдяні луски	Частково заміщають азбест у цементних настилах, бетонних трубах; ремонтні матеріали
Волокна кокосової пальми, джуту та інш.	Покрівельні матеріали і лицювальні панелі

Сталефібробетони. Найбільш поширені фібробетони на портландцементі, армовані сталевим волокном – сталефібробетони. Сталеve волокно звичайно представлене відрізками дроту, у тому числі з відпрацьованих канатів. Фібри можуть мати різний поперечний переріз – круглий, овальний й ін. розмірами від 0,2 до 1,6 мм і довжину від 10 до 160 мм. Поверхня фібр може бути профільована, оброблена травленням і, як виключення, гладкою. Кількість фібр, що вводяться в бетон, у більшості випадків коливається від 0,5 до 2% по об'єму. Введення в бетон сталевих фібр у кількості 1...1,5% по об'єму збільшує його міцність на розтяг до 100%, міцність на згин на 150...200%, міцність на стиск підвищується на 10...25%.

За рахунок більш високої тріщиностійкості сталефібробетон відрізняється підвищеною в 1,5...2 рази морозо-, жаро- і вогнестійкістю, водонепроникністю. Цінними якостями сталефібробетону є підвищена зносостійкість, ударна і динамічна стійкість. Так, зносостійкість сталефібробетону збільшується до 30...50%, а опір удару до 10...12 разів.

Використання сталефібробетону перспективно як у збірних, так і в монолітних конструкціях: дорожніх і аеродромних покриттях, торкретних шарах для облицювання шахт тунелів і вогнезахисних футеровок, тонкостінних і

ребристих плитах, покриттях, елементах оболонок, паль, шпал та ін.

Ефективність застосування сталевібробетонних конструкцій може бути досягнута за рахунок зменшення працємисткості арматурних робіт, скорочення витрати сталі і бетону за рахунок зменшення товщини конструкцій, суміщення технологічних операцій приготування бетонної суміші й армування, збільшення довговічності конструкцій і зниження витрат на поточний ремонт.

При значних прольотах і навантаженнях у конструкціях доцільне об'єднання фібрового і стержневого армування, тобто застосування комбінованого армування.

Введення сталевих волокон у бетонну суміш представляє певні технологічні труднощі, що зв'язано з грудкуванням, утворенням "їжаків", складністю належного ущільнення матеріалу. Фібру вводять у попередньо перемішану суміш цементу, води і заповнювача або змішують спочатку заповнювачі і волокна, а потім додають цемент і воду. Для приготування фібробетону використовують також змішувачі з пульсуючим впливом на суміш і інші спеціальні змішувачі.

Сталевими, як і неметалічними волокнами, армують, як правило, дрібнозернисті бетони або цементний камінь. Дисперсне армування ефективно запобігає розвитку волосяних тріщин тільки при відстані між волокнами не більше 10...12 мм. Для розрахунку коефіцієнта відстані між волокнами (S) для дисперсно-армованих композитів запропонований ряд формул. Найбільш проста з них наведена нижче:

$$S = \sum V_f / V_f, \quad (5.5)$$

де V_f – об'єм одного волокна; V_f – об'ємний відсоток волокна.

Зі зменшенням значення коефіцієнта S збільшується міцність композитів на розтяг і згин.

Склофіробетони. Поряд зі сталевібробетоном у будівництві є позитивний досвід застосування склофіробетонів (склоцементів), що дозволяють додатково істотно знизити масу конструкцій. Їх одержання засноване на включенні в цементне тісто або цементно-піщаний розчин

лугостійкого волокна в кількості до 5% за масою. Міцність на розтяг і згин армованого склом розчину перевищує міцність неармованого розчину в 2...3 рази навіть після 10 років повітряного зберігання. Максимальна деформація від граничного розтягуючого зусилля для склоармованого розчину в 10 разів більша, ніж для неармованого.

Матеріали цієї групи отримують із застосуванням як гідравлічних (портландцемент і його різновиди, глиноземистий цемент), так і повітряних в'язучих (гіпс, каустичний магнезит). Армуючими матеріалами служать триси і джути, звіти з тонких скляних ниток, сітки з безлужного скловолокна. Застосовують також волокно, отримане витягуванням з базальтового розплаву.

У композиціях на основі мінеральних в'язучих, армованих скляною арматурою, вдало сполучаються властивості вихідних компонентів і досягається висока міцність і довговічність. Питома міцність склоцементу в 1,5 рази вища за питому міцність сталі А-І, а густина нижча густини алюмінієвих сплавів у 1,5...2 рази. Відносні деформації склоцементу в момент утворення мікротріщин у матриці в 30...60 разів вище чим у залізобетону. Використання склоцементних композицій замість залізобетону дозволяє знизити масу конструкцій у 8...10 разів і скоротити витрати цементу в 2...4 рази.

Властивості скловолокна залежать від хімічного складу скла і способу його отримання. За хімічним складом скляні волокна поділяють на три групи: безлужні (вміст лужних оксидів не більш 1...2% по масі), малолужні (від 2 до 10%) і лужні (більш 10% по масі лужних оксидів). Міцність при розтягу скловолокна набагато вища міцності масивного скла, що пояснюється його меншою неоднорідністю, наявністю зміцненого поверхневого шару. Збільшення міцності зі зменшенням діаметра волокон (рис.5.3) пояснюється меншими температурними градієнтами, що виникають при охолодженні скла і, відповідно, меншою інтенсивністю утворення тріщин.

Найбільшою міцністю відрізняється волокно з безлужного алюмоборосилікатного скла. Лужні оксиди знижують міцність скловолокна (рис.5.4). Найменшою міцністю володіють волокна з фосфатного і боратного стекл. Вилугованість волокна значною мірою визначається його діаметром (рис.5.5).

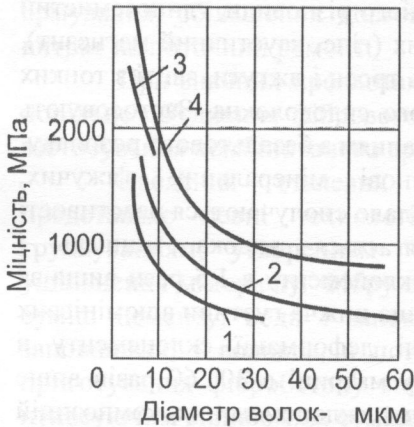


Рис.5.3. Залежність границі міцності від діаметру волокна, отриманого різними способами: 1 – роздувом; 2 – штабіковим; 3 – витягуванням з фільтр стисненим повітрям; 4 – витягуванням з фільтр за допомогою швидкісного барабану

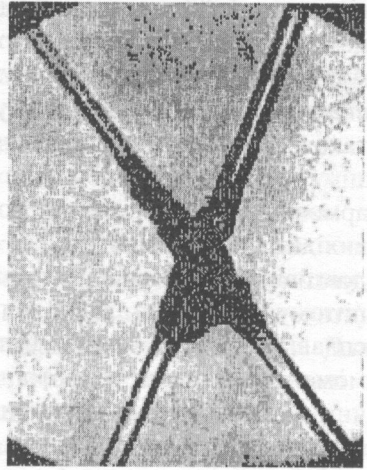


Рис.5.4. Мікрофотографія волокна скла з вмістом 18,9% Na_2O , витриманого у вологому середовищі протягом 180 діб ($\times 280$)

Середня міцність елементарного скловолокна складає 3500 МПа. Атмосферна волога зменшує міцність скла. Після декількох місяців зберігання міцність скловолокна зменшується на 10...15% у порівнянні з початковою. Для запобігання зниження міцності волокна під дією атмосферної вологи, його при витягуванні захищають гідрофобними речовинами.

У лужному середовищі цементного каменю, що твердіє, відносно високою стійкістю відрізняються стекла в системі $\text{Na}_2\text{O}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ складів (мол. %): Na_2O 0,14...0,3; MgO

10...30; Al_2O_3 0...15; SiO_2 50...70. Промислові волокна випускають у вигляді коротких (до 60 см) зразків одиночних волокон (штапельне волокно) і безперервних довжиною сотні і тисячі метрів.

Збільшення міцності скловолкна досягається впливом на його поверхню з метою зменшення кількості мікродефектів при термообробці.

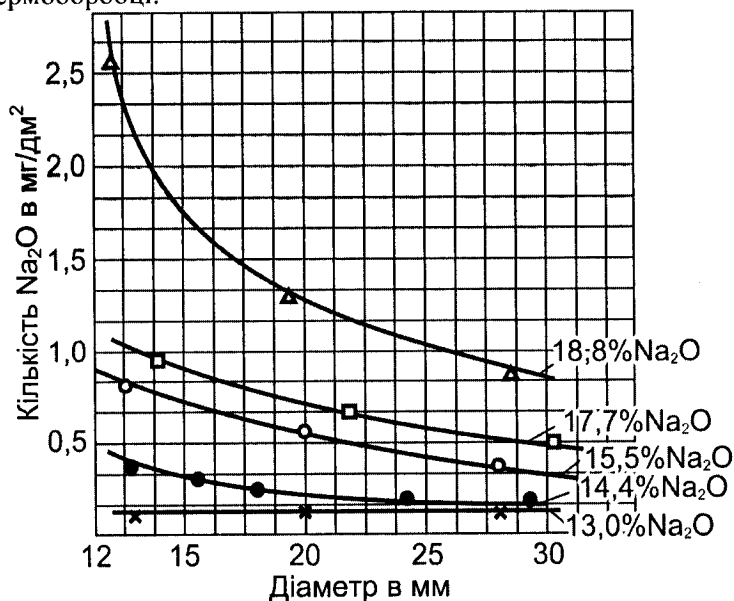


Рис.5.5. Залежність вилуговування скляного волокна від його діаметра для стекол, що містять різну кількість Na_2O , після витримування його у вологому середовищі 75 діб

З базальтових розплавів, так само як зі скляних, одержують штапельні і безперервні волокна. Безперервне волокно переробляють у ровинг (джут), ткани і неткані матеріали. Зі штапельних волокон виготовляють вату, рулонні матеріали, мати, полотна й ін.

Детальні дослідження склоцементних матеріалів виконані в Київському політехнічному інституті (О.О.Пашенко,

В.П.Сербин, В.В.Глуховський та ін.). В результаті цих досліджень вивчені процеси взаємодії неорганічних в'язучих зі скляними волокнами, розроблені оптимальні склади склоцементних матеріалів. Встановлено, що при твердінні композиції портландцементний камінь- скловолокно на поверхні останнього виділяється кристалічна фаза, що утворює довкола нього щільну оболонку, яка складається із субмікрористалів гідросилікатів і гідроалюмінатів кальцію. Зі збільшенням віку портландцементного каменю розміри кристалів і товщина полікристалічної оболонки збільшуються. В середовищі портландцементу під час твердіння волокно піддається корозії і міцність композиційних матеріалів зменшується. В середовищі глиноземистого цементу під час його твердіння безлужні і лужні волокна не зазнають істотних змін.

Для захисту скловолокнистої арматури запропоновано обробляти її лугостійкими складами органічних олигомерів, що здатні полімеризуватись при твердінні в'язучих. Позитивний ефект характерний також при використанні захисних кремнійорганічних покриттів скловолокна.

Застосовують два основні способи армування бетонів волокнами: спрямоване і хаотичне. Орієнтований вплив способу армування на міцність скловолокнистих матеріалів уздовж волокон наведено нижче:

Розподіл волокон	Міцність, %
Односпрямоване	100
Сітчасте	45...50
Двомірне хаотичне	30...37
Тримірне хаотичне	0...20

Міцність склоцементу на розтяг зростає лінійно зі збільшенням вмісту скловолокна (рис.5.6).

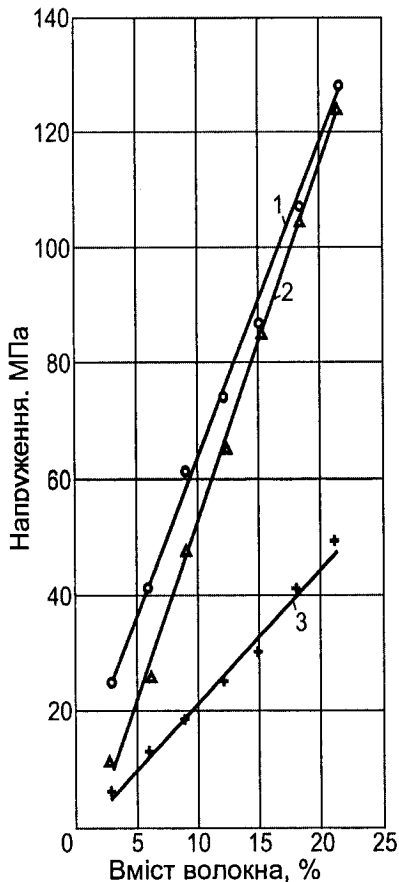


Рис.5.6. Зміна характеристик міцності склосцементу при розтягуванні вздовж волокна у залежності від вмісту скловолокна: 1 – границя міцності; 2 – напруження внаслідок утворення тріщин в цементному камені; 3 – умовна границя пропорційності

Базальтофібробетони

Одним з ефективних різновидів мінеральних волокон для дисперсного армування бетонів є базальтове волокно.

Воно характеризується високою міцністю 1600...3600 МПа.

Основними особливостями фібробазальтобетону є його висока міцність при всіх видах напружених станів і здатність витримувати значні деформації в пружному стані. При цьому відносна деформація цементного каменю без утворення тріщин досягає 0,7...0,9%, що в 35-45 разів перевищує граничне видовження неармованого каменю. Значне збільшення деформативності і міцності цементного

каменю відбувається за рахунок усунення базальтовими волокнами впливу концентрації напружень в місцях, ослаблених структурними дефектами (раковинами, мікротріщинами).

Базальтове волокно хімічно інертне, не вступає в реакцію з солями або барвниками, тому бетони, армовані базальтовими волокнами, застосовують при будівництві морських споруд, і в архітектурному і декоративному бетонах.

У дорожніх покриттях базальтове волокно захищає бетон і арматуру від проникнення агресивних речовин, а також підвищує залишкову міцність і стійкість до заморожування-відтавання, підвищує шорсткість поверхні. Показано, що використання базальтової арматури може суттєво покращити захист залізобетонних конструкцій від руйнівного впливу корозії. Встановлено, що міцність базальтових волокон у лужному середовищі портландцементу може зменшуватися на 5...10% тільки в перші 3...6 місяці, а руйнування поверхні волокон відбувається на глибину не більше 4 мкм. За рахунок утворених раковин міцність зчеплення цементного каменю і волокна збільшується, що зумовлює зростання міцності самого виробу. При використанні волокон діаметром понад 100 мкм їх міцність практично не змінюється.

Фібробетони з поліпропіленовими волокнами. З полімерних волокон, що застосовуються для армування бетону, найбільш поширені поліпропіленові. Характерна їх особливість – добра сумісність з портландцементом і висока стійкість в середовищі твердіючих в'язучих. Поліпропіленові, як і інші полімерні волокна (табл.5.2), виготовляють діаметром 10...500 мкм. У поперечному розрізі вони можуть мати як круглу, так і прямокутну форму.

Введення в бетонну суміш 0,1...1% (за об'ємом) поліпропіленових волокон дозволяє зменшити розшаровуваність суміші і поліпшити її перекачуваність насосом, істотно підвищити деформативність і тріщиностійкість бетону.

Таблиця 5.2

Фізико-механічні властивості волокнистих матеріалів

Вид волокна	Матеріал	Середня густина, г/см ³	Діаметр, мкм	Міцність на розтяг, МПа·10 ³	Модуль пружності, МПа·10 ³	Видовження при розтязі, %	Вогнестійкість, °С
Природні неорганічні	Азбест	2,6	0,2...30	0,91...3,1	68	0,6	1450
Штучні неорганічні	Вуглець	2	5...10	2	245	1	400...1600
	Скло	2,6	5...20	1,05...3,85	70...80	1,5...3,5	800
	Сталь	7,8	5...500	0,8...3,15	200	3...4	1500
Полімерні	Нейлон	1,1	10...500	0,77...0,84	4,2	16...20	250
	Полі- ефір	1,4	10...500	0,73...0,78	8,4	—	250
	Полі- пропі- лен	0,9	10...500	0,4...0,77	3,5...8	10...23	150
	Полі- етилен	0,95	10...500	0,7	1,4...4,2	10	—
	Акрил	1,1	10...500	0,21...0,42	2,1	25...45	—

Поліпропіленові волокна також як і сталеві значно підвищують ранню міцність композитів на розтяг. При добавці вже 0,1% волокна усадка знижується до 50%, істотно збільшується міцність бетону на згин і опір удару. Бетони з поліпропіленовими волокнами мають високу морозостійкість, бактерицидність, вогнестійкість. Їх застосовують у конструкціях морських споруд, мостів, водоймищ, торкретних облицюваннях. У порівнянні зі сталевую фіброю поліпропіленова простіше дозується, полегшує укладання бетонної суміші.

6. ОПОРЯДЖУВАЛЬНІ БЕТОНИ І РОЗЧИНИ

БЕТОНИ ДЛЯ ПІДЛОГ

Опоряджувальні (архітектурні) бетони мають у порівнянні зі звичайними покращену архітектурну виразність, яка досягається наданням певного кольору і фактури лицевої поверхні. Їх застосовують для архітектурного оздоблення будівель та споруд, улаштування підлог, виготовлення малих архітектурних форм, декоративних дорожніх покриттів. Широкого поширення набули бетони, що імітують природний камінь і деревину. Опоряджувальні бетони та розчини виготовляють як безпосередньо на об'єкті, так і в заводських умовах. В останньому випадку їх використовують для створення фактурного шару різних елементів будівель і споруд, а також на їх основі виготовляють різноманітні вироби для оздоблювальних робіт.

6.1. Кольорові бетони

Кольорові бетони є основним різновидом декоративних бетонів. Для їх отримання застосовують білі, кольорові та звичайні портландцементи з додаванням пігментів, а також інші види в'язучих матеріалів – гіпс, вапно, магнезіальні в'язучі, рідке скло, синтетичні полімери та декоративні заповнювачі.

До числа традиційних пігментів для отримання кольорових цементів, що мають достатню фарбувальну здатність, стійкість до лужного середовища, сонячного світла та атмосферних впливів можна віднести: вохру, що надає цементу жовтий колір, сурик – червоний, оксид хрому – зелений, оксиди кобальту та ультрамарину – блакитний, марганцю – чорний і коричневий, вуглецеві пігменти – чорний. Застосовують також різноманітні органічні пігменти, вміст яких допускається у кількості, як правило, не більше 0,5% маси цементу.

Білий портландцемент виготовляють із малозалізистого клінкеру, що відрізняється від звичайного підвищеним вмістом SiO_2 (23,5...25,5%) і Al_2O_3 (5,5...7%) і незначною кількістю Fe_2O_3 (0,25...0,5 %) і MnO (0,05...0,15%). Мінеральний склад клінкеру для білого цементу %: C_3S – 35...50; C_3A – 14...17; C_4AF – 0,9...1,4. Кількість MgO не повинна перевищувати 4%.

За складом розрізняють білий портландцемент і білий портландцемент з мінеральними добавками. Останні додають у кількості, що не перевищує 20% маси цементу в т.ч. до 10% активних мінеральних добавок осадового походження і до 10% добавок - наповнювачів. За погодженням із споживачем можна додавати в білий цемент спеціальні добавки не більше 2% маси цементу, пластифікуючі – не більше 0,5%. Білий цемент випускають марок М 400 і М 500. Тонкість помелу білого портландцементу повинна бути такою, щоб залишок на ситі №008 був не більше 12%, а питома поверхня – не менше 250 $\text{m}^2/\text{кг}$.

Залежно від ступеню білизни, яка характеризується коефіцієнтом відбиття (K_b) білий портландцемент виготовляють трьох сортів: для 1 сорту – $K_b \geq 80\%$, 2-го – 75% і 3-го – 70%.

Для підвищення білизни цементу клінкер піддають *відбілюванню*. При мокрому способі виробництва і підвищеному вмісті оксиду заліза ефективний спосіб хлорування, при якому залізо з клінкеру видаляється у вигляді летких хлоридів. Для хлорування у сировинну суміш додають хлористі солі NaCl , CaCl_2 та ін.

Позитивні результати отримують при випалюванні клінкеру в слабовідновлювальному середовищі з подальшим водним відбілюванням. При газовому або швидкому водному відбілюванні малозалізистого клінкеру підвищення ступеня білизни є результатом зниження валентності оксидів заліза,

зміни координації фарбуючих оксидів. Отримання клінкеру з певним коефіцієнтом білизни залежить від швидкості охолодження і середовища, в якому охолоджується клінкер (рис.6.1).

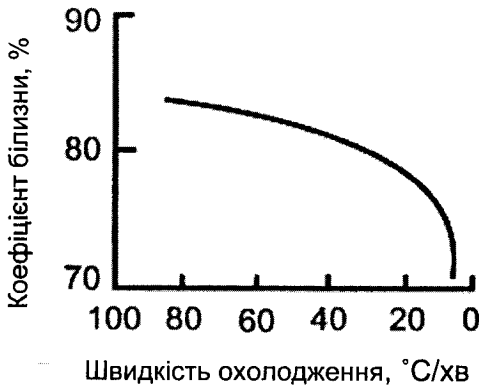


Рис. 6.1. Залежність коефіцієнта білизни від швидкості охолодження

У відновному середовищі присутній у клінкері оксид заліза Fe_2O_3 відновлюється до Fe_3O_4 . Цей оксид має меншу фарбувальну здатність і підвищує білизну клінкеру. При газовому способі клінкер охолоджують у слабо-

відновному середовищі генераторним газом від температури 1100...1200° С до 200°С.

Різке охолодження (рис. 6.2) також дозволяє в клінкері зафіксувати сполуки двовалентного заліза. При водному відбілюванні клінкер з печі при температурі близько 1300° С вивантажують в басейн з водою, а потім висушують у сушильному барабані.

Позитивний вплив має застосування намагніченої води та слабких розчинів кислот. Існує також і комбінований спосіб відбілювання клінкеру, при якому його спочатку охолоджують у відновному середовищі, а потім у воді. При вмісті Fe_2O_3 більше 2% білизна на 3...5% вища ніж при газовому відбілюванні. Обидва способи при вмісті $Fe_2O_3 < 2\%$ дають приблизно

однаковий ефект, але більш економічним є газове відбілювання, яке не потребує подальшого підсушування клінкеру.

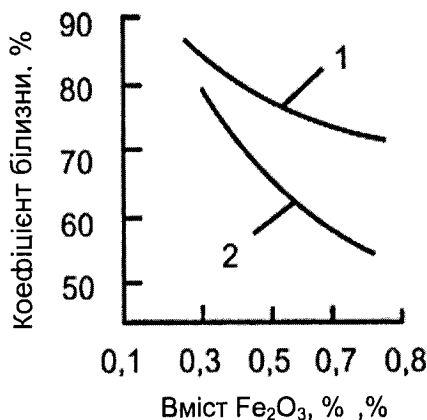


Рис. 6.2 Залежність коефіцієнта білизни клінкеру від вмісту заліза:

- 1 – різке охолодження у воді;
- 2 – різке охолодження на повітрі

Помел білого клінкеру спільно з гіпсом здійснюють у кульових млинах кулями з ураліту або хромонікелевої сталі. Застосування добавок ПАР при помелі дозволяє не тільки підвищити продуктивність млинів і знизити витрату електроенергії, але і збільшити ступінь білизни цементу.

Для підвищення стійкості білого

цементу проти появи вапняних вицвітів при помелі клінкеру додають 5... 10% білої гідравлічної добавки – випаленого каоліну, діатоміту та ін.

Ступінь білизни цементу і добавок визначають в % абсолютної шкали фотометром, а також використовуючи матове скло.

Кольоровий портландцемент виготовляють методом тонкого спільного подрібнення білого або кольорового клінкеру, активної мінеральної добавки, пігменту та гіпсу. Кольорові клінкери отримують при введенні в сировинні суміші невеликої кількості сполук кобальту, хрому, марганцю і т.п.

Кольоровий портландцемент повинен містити (у % від маси цементу): клінкеру – не менше 80, активної мінеральної добавки – не більше 6, мінерального штучного або природного

6. Опоряджувальні бетони і розчини. Бетони для підлог

пігменту – не більше 15, органічного пігменту – не більше 0,5. Вміст гіпсу – не більше 3,5% в розрахунку на SO₃. Білизна активної мінеральної добавки – не менше 68%.

Кольоровий цемент поділяють по міцності на марки: М300, М400 і М 500.

Таблиця 6.1

Зміна інтенсивності кольору цементу залежно від кількості доданого пігменту

Колір	Інтенсивність кольору	Пігмент	Вміст пігменту, %	
			в білому цементі	в звичайному цементі
Жовтий	Слабка	Вохра	5	10
	Середня		10	15
Червоний з коричневим відтінком	Слабка	Сурик залізний	2	3
	Середня		4	5
	Висока		6	8
Червоний	Слабка	Редоксайд	2	3
	Середня		3	5
	Висока		5	8
Зелений	Слабка	Оксиди хрому	1	3
	Середня		3	5
	Висока		5	–
Коричневий	Слабка	Суміш сурику залізного і піролюзиту	1	4
	Середня		5	10
	Висока		10	–
Синій	Слабка	Ультрамарин	1	3
	Середня		3	5
	Висока		5	8

Пігменти, для кольорового цементу повинні мати достатню фарбувальну здатність, високу стійкість до лугів, сонячного світла і атмосферного впливу. Вони не повинні містити шкідливих домішок і розчинних солей. Зміна інтенсивності кольору цементу залежно від кількості доданого пігменту приведена в табл.6.1. Для розширення палітри кольоровий цемент підфарбовують органічними барвниками.

ДСТУ Б В.2.7-268:2011 передбачає отримання кольорових портландцементів червоного, жовтого, зеленого, блакитного, рожевого, коричневого та чорного кольору. Для отримання портландцементу жовто-червоної гама та коричневого кольору допускається застосовувати клінкер і активні добавки білизною не менше 40%.

Білий і кольоровий цемент характеризуються підвищеною усадкою при твердінні. Усадочні деформації зростають зі збільшенням у складі цементу вмісту беліту і трикальцієвого алюмінату, активних мінеральних добавок і деяких пігментів.

Морозостійкість кольорових цементів знижується при збільшенні вмісту мінеральних пігментів (табл.6.2).

Активні мінеральні добавки, що зв'язують гідроксид кальцію в малорозчинні гідросилікати кальцію, значною мірою зменшують утворення вицвітів на декоративних облицюваннях. Цьому сприяє також введення в білий і кольоровий цемент гідрофобізуючих добавок.

Таблиця 6.2

Морозостійкість зразків (цикли) цементного каменю залежно від виду та кількості введених пігментів

Пігмент	Вміст пігменту %				
	0	4	8	20	30
Вохра	200	150	100	50	-
Сурик залізний	200	200	200	150	150
Оксиди хрому	200	200	200	-	-
Піролюзит	200	200	200	150	100
Ультрамарин	200	200	200	100	-
Редоксайд	200	200	200	150	100
Кіновар	200	150	100	150	-
Сажа	200	100	50	-	-

6. Опоряджувальні бетони і розчини. Бетони для підлог

Введенням пігментів забарвлюють поряд з білим і звичайний цемент. Цемент світлих тонів виготовляють також на основі звичайного портландцементу з розбілюючими мінеральними добавками (крейдою, меленим вапняком, мармуром і т.п.), а також з білилами.

Виготовлення кольорових в'язучих рекомендується шляхом спільного помелу цементу з пігментами в кульових або вібраційних млинах. Допускається також перемішування сухих пігментів і компонентів бетонної суміші в процесі її виготовлення. Для підвищення точності дозування застосовують пігменти у вигляді водної суспензії, які найчастіше виготовляється безпосередньо на бетонному заводі шляхом змішування пігментів і води в пропелерних змішувачах безпосередньо перед подачею в бетонозмішувач. Для поліпшення диспергації пігментів можуть використовуватися добавки ПАР.

Декоративні щебінь і пісок виготовляють подрібненням гірських порід, забарвлених у різні кольори (граніту, діориту, діабазу, андезиту, кварциту, мармуру та ін.). Залежно від крупності зерен пісок поділяють на фракції до 2,5 і 2,5...5 мм. Для щебеню встановлені фракції 5...10, 10...20, 20...40 мм. Можлива при згоді сторін поставка піску і щебеню інших фракцій.

Для заповнювачів крупністю понад 2,5 мм зерновий склад повинен знаходитися в наступних межах:

Діаметр отворів контрольних сит	d*	0,5(d+D)		D*
		(для однієї фракції)	(для суміші фракцій)	
Повний залишок на ситах, % по масі	90...100	40...80	50...60	0...10

d* – мінімальний розмір, мм, D* – максимальний розмір, мм.

До зернового складу піску фракцій до 2,5 мм висувають такі вимоги: повний залишок на ситі 2,5 мм – не більше 10%; 0,14 мм – не менше 90% маси. Марки за міцністю щебеню і піску не нижче: з вивержених порід – М800, з метаморфічних – М400, з осадових – М300.

Для щебеню встановлюють марки за морозостійкістю: F 15, F 25, F 50, F 100, F 200 і F 300. Для піску їх визначають випробуванням вихідної гірської породи.

При формуванні декоративних бетонних виробів уникають забруднення поверхонь мастилами для форм шляхом використання полімерних плівок і форм, а також негайної розпалубки (при застосуванні наджорстких сумішей та інтенсивних методів ущільнення).

Сучасні технології дозволяють отримувати різні типи поверхні бетону від полірованої до фактури з необхідним типом рельєфу.

Для надання *декоративної фактури* обробляють поверхню бетону шліфувальними машинами, фрезами, бучардами, пневмомолотками, піскоструйними апаратами. Фактурна обробка поверхні свіжоукладеного бетону здійснюється також з використанням спеціальних опалубок з рельєфною поверхнею, кріпленням на щити опалубки матриць (гумових, склопластикових, пластмасових) з фактурною поверхнею, змиванням поверхневого цементно-піщаного шару з метою оголення крупного заповнювача бетону. В останньому випадку фактурна обробка застосовується безпосередньо після бетонування конструкцій або із застосуванням спеціальних мастил та речовин, що уповільнюють твердіння поверхневого шару. Фактурна обробка свіжоукладеного бетону може здійснюватися накаткою рельєфними валиками. Цей спосіб застосовують при формуванні виробів "лицем вгору". На

конструктивний шар укладається шар дрібнозернистого оздоблювального бетону, який після вирівнювання накатують рельєфним валиком для отримання заданої фактури.

У будівництві також поширеним є оздоблення бетону подрібненим каменем. Найбільший декоративний ефект досягається при застосуванні кам'яної крихти розміром 5...10 або 10...20 мм. Поряд з природним каменем застосовують бій скла, керамічних плиток та ін.

Технологія *штампованого бетону* дозволяє отримувати покриття і рельєфний відтиск, які відтворюють текстуру натурального каменю, цегли, деревини за допомогою спеціальних штампів. Після зняття штампів і затвердіння бетону на його поверхню наносять спеціальні покриття - зазвичай акрилові, які забезпечують надійний захист від руйнування при впливі різних агресивних середовищ. Акрилове покриття підвищує також морозостійкість і зносостійкість поверхні декоративного бетону.

Застосовують також різні способи захисного просочення бетону: флюатування, гідрофобізацію, кольматування. Така обробка бетону забезпечує збереження декоративності його поверхні протягом тривалого часу без спеціального догляду.

В останні роки розроблені нові види декоративних бетонів. Один з них – т.зв. "*прозорий*" бетон. Цей бетон був запропонований в 2001р. угорським архітектором А.Лозонці. Він відомий на ринку як "бетон, що передає світло" (Light Transparent Concrete - LiTraCon). Ефект прозорості досягається додаванням у дрібнозернистий бетон до 5% оптичних волокон розміром від 2 мкм до 2 мм у діаметрі. Скловолокна в бетоні забезпечують світлопередачу навіть у масивних конструкціях. З прозорого бетону можуть виготовлятися конструкції, що

працюють під навантаженням і мають поліпшені теплоізоляційні характеристики.

Для отримання бетонів з високою якістю поверхні ефективним є введення в бетонні суміші добавок суперпластифікаторів, застосування в'язучих низької водопотреби.

6.2. Декоративні розчини

Декоративні розчини застосовують для зовнішнього і внутрішнього опорядження будівель, а також для оздоблення лицьових поверхонь стінових панелей та блоків. Вибираючи в'язучі для приготування декоративних розчинів, необхідно враховувати вид оздоблювальних поверхонь.

Кольоровими вапняно-піщаними сумішами опоряджують фасадні частини будівель. Для штукатурення інтенсивно зволужуваних поверхонь зі щільного бетону, цоколів, пілястрів використовують суміші з підвищеним вмістом цементу.

Фактура затверділої штукатурки залежить від методу нанесення покривного шару і способу його обробки. В основному кольоровими вапняно-піщаними штукатурками імітують піщаник і травертин. З вапняно-піщаних сумішей виготовляють також штукатурки типу *«сграфіто»*. Для тонкошарового одноколірного сграфіто на перший покривний кольоровий шар пензлем наносять другий товщиною 0,3...0,5 мм, який прошкрібують за малюнком, нанесеним крізь трафарет. При двоколірному сграфіто (табл. 6.3) ґрунт покривають кольоровим шаром, а після його затвердіння – другим шаром іншого кольору. На другий шар за трафаретом наносять малюнок і прошкрібують по ньому до оголення нижнього шару.

Таблиця 6.3

Склади розчинів для двоколірного сграфіто, % маси:

Нижній шар		Верхній шар	
Коричневий		Жовтий	
Вапняне тісто	21,3	Вапняне тісто	22
Портландцемент	6	Портландцемент	5
Вохра золотиста	6	Вохра золотиста	3
Умбра	1,7	Пісок кварцовий	70
Пісок кварцовий	65		
Коричневий		Синій	
Вапняне тісто	25,6	Вапняне тісто	54
Вохра золотиста	2,5	Ультрамарин	12
Умбра	5,4	Оксид хрому	6
Палена кість	0,5	Мармурова мука	28
Пісок кварцовий	66		
Помаранчевий		Червоний	
Вапняне тісто	22,8	Вапняне тісто	60
Вохра золотиста	2,4	Вохра золотиста	5
Пігмент червоний	0,12	Пігмент червоний	5
Мумія червоно-коричнева	0,6	Мармурова мука	30
Пісок кварцовий	74		
Рожевий		Кремове-рожевий	
Вапняне тісто	30	Вапняне тісто	39
Мелена цегла	10	Вохра золотиста	0,5
Пісок кварцовий	60	Мумія світла	0,5
		Мармурова мука	60

Перші шари багатоколірного сграфіто виконують із кольорових розчинів, а додаткове забарвлення створюють методом фрескового живопису.

Теразитові розчини виготовляють зазвичай з сухих кольорових сумішей, до складу яких входить мармурова або інша декоративна кам'яна крихта.

Фактура теразиту залежить від граничної крупності зерен заповнювача. Дрібнозернисті заповнювачі до теразитових сумішей мають зерна 0,15...2 мм, середньозернисті – 2...4 мм,

крупнозернисті – 4...6 мм. Крупнозернистий теразит (теразит К) при обробці фасадів використовують для штукатурення цоколів і нижніх поверхів, середньозернистий (теразит С) – для поверхонь стін, дрібнозернистий (теразит Д) – для влаштування карнизів. При формуванні залізобетонних панелей для їх обробки використовують теразитові суміші з білого цементу і кольорової кам'яної крихти у співвідношенні від 1:4 до 1:5. Зерновий склад кам'яної крихти: фракція 1,2...2,5 мм – 35...40; 2,5...5 мм – 60...65%. Кількість води підбирають так, щоб рухомість теразитової суміші характеризувалася зануренням конуса 2...3 см. Після нанесення і ущільнення оздоблювального шару на поверхню виробу розпилюють воду; внаслідок цього цементне тісто вимивається з зовнішнього боку зерен кольорового заповнювача і заповнює порожнини між його зернами.

Каменеподібними штукатурками оздоблюють в основному фасади та цоколи монументальних споруд. Основним в'язучим слугує цемент; вапняне тісто вводять у кількості 10...20% для надання розчиновим сумішам пластичності та розбілювання. Як заповнювач використовують зазвичай крихту, яка імітує гірські породи. Важливе значення при цьому надається зерновому складу кам'яної крихти, який повинен відповідати способу обробки поверхні затверділого розчину і потрібній фактурі.

Затверділий декоративний шар каменеподібної штукатурки обробляють каменетесними інструментами, бучардою, піскоструйними апаратами. Застосовують також обробку циклюванням, набризком та ін. Для кращого оголення кам'яної крихти застосовують 10...15%-й розчин соляної кислоти.

У сучасному будівництві для опорядження будівель і споруд широко використовують *тонкошарові декоративні фасадні штукатурки*, що виконуються з використанням в якості в'язучого портландцементу, рідкого скла, акрилових і силіконових смол. Вони виготовляються зазвичай з готових порошкоподібних і мастичних (пастових) сумішей. Тонкошарові штукатурки мають як декоративну, так і захисну функцію, утворюючи шар, стійкий до атмосферного, в тому числі ультрафіолетового впливу, а також механічних пошкоджень. Легкі штукатурки покращують теплоізоляційні властивості стін, зберігають потрібний мікроклімат всередині приміщень, забезпечують виконання спеціальних вимог: екранування радіохвиль, захист від рентгенівського випромінювання, шуму і т.п. В окрему групу виділяють штукатурки, що застосовуються в реставраційних роботах. Однією з основних вимог до декоративних штукатурок при виконанні реставраційних робіт є достатня швидкість дифузії водяної пари.

Основною групою тонкошарових штукатурок є декоративні фасадні штукатурки товщиною 1...3 мм, що укладаються у вигляді оздоблювального шару як традиційних цементно-вапняних штукатурок, так і систем теплоізоляції будівель.

Тонкошарові штукатурки дозволяють отримувати як різноманітну колірну гамму, так і різні види фактур після затирання гладкою нержавіючою теркою. Поширені рустикальна ("короїд") і шорстка ("барашек") фактури. Першу отримують вертикальними і круговими рухами, другу – круговими.

Мінеральні штукатурки виготовляються у вигляді сухих сумішей на основі портландцементу і кварцової або мармурової крихти з розміром зерна до 1,5; 2 або 3 мм.

Акрилові штукатурки мають консистенцію пасти і виготовляються на основі водної дисперсії акрилових смол. Вони утворюють гідрофобне покриття з великою стійкістю до механічних пошкоджень, однак, старіють під впливом ультрафіолетових променів. Різновидом акрилових штукатурок є *мозайчна штукатурка*. Вона виготовляється на основі акрилової смоли з додаванням мармуру і кольорової кварцової крихти та має високу міцність, стійкість до миття, очищення, рекомендується для опорядження сходових площадок, цоколів, стін.

Силікатні та силіконові штукатурки застосовують у вигляді готових до застосування мас, виготовлених відповідно на основі рідкого скла і кремнійорганічної смоли, мармурової, доломітової та ін. крихти. Утворюють міцні поверхні з високою еластичністю, що пропускають водяну пару, стійкі до миття та біологічної корозії. Силіконові штукатурки здатні до самоочищення під впливом атмосферних опадів.

Тонкошарові декоративні штукатурки дозволяють отримувати покриття відомі як "*венеціанські штукатурки*". Вперше такі покриття були отримані в епоху ренесансу у Венеції на основі мармурового пилу, вапна, рослинних барвників і води. В даний час подібні штукатурні склади обов'язково містять акрилові в'язучі. Як правило, "венеціанські штукатурки" з підвищеним вмістом полімеру утворюють більш еластичні і тріщиностійкі покриття.

Полімерні штукатурки стійкі до атмосферних впливів, ударостійкі, гідрофобні, паропроникні, легко наносяться на поверхні конструкцій, не шкідливі для здоров'я людей. Покриття можуть виконуватися як в одному кольорі, так і багатьома кольоровими. Венеціанська штукатурка передбачає "підпресування" кількох тонких напівпрозорих шарів матеріалу.

Завдяки «грі» відбитих променів світла, що проходять через товщу покриття, венеціанська штукатурка нагадує полірований мармур. Технологія отримання покриття включає операції загладжування, "залізнення" і полірування кожного шару. Готове покриття має товщину 3...5 мм, характеризується високою паропроникністю, що створює в приміщенні хороший мікроклімат. Венеціанська штукатурка дозволяє художникам створювати на її поверхні декоративні панно, розпис робиться по вологому останньому шару спеціальними пігментами.

6.3. Бетони для підлог

Бетон для покриття підлог вибирають з урахуванням комплексу вимог, що забезпечують його експлуатаційну надійність, естетичність, санітарно-гігієнічну безпеку. Для покриттів підлог виробничих приміщень застосовують залежно від інтенсивності руху, питомого тиску від зосереджених навантажень, температури нагрівання важкі цементні бетони, піщані бетони, мозаїчні бетони, полімерцементні бетони. За певних умов застосовують також жаростійкі бетони, бетони зі зміцненим верхнім шаром, металоцементні бетони, ксилоліт, асфальтові бетони. Бетонні покриття підлог можуть застосовуватися при тиску від зосереджених навантажень до 100 МПа, температурі нагрівання до 100° С (із жаростійкого бетону – до 600°С). Товщина бетонного покриття і клас бетону за міцністю призначаються залежно від інтенсивності механічних впливів на підлогу (табл.6.4).

Для громадських будівель застосовують шліфовані цементно-бетонні та мозаїчно-бетонні покриття в приміщеннях, експлуатація яких не пов'язана з постійним перебуванням у них людей (музеї, виставки, вестибюлі, вокзали тощо), а також у ванних, душових, умивальних приміщеннях будівель різного призначення, у деяких приміщеннях магазинів, підприємств громадського харчування та ін.

Таблиця 6.4

Товщина бетонного покриття та міцність бетону на стиск

Матеріал покриття підлоги	Товщина покриття, мм/ міцність бетону на стиск, МПа			
	Інтенсивність механічних впливів			
	дуже значна	значна	помірна	слабка
Бетон цементний	50/50	30/40	25/30	20/20
мозаїчний	не застосовується	30/40	25/30	20/20
полімер-цементний	не застосовується	30/40	20/30	20/20
метало-цементний розчин	40/50	20/50	не застосовується	не застосовується
піщаний бетон	не застосовується	не застосовується	30/30	20/20

Цементні бетони. Бетонні покриття виконують по ґрунтових основах, підстилаючих бетонних шарах, залізобетонних плитах перекриттів і по цементно-піщаним стяжкам. Для безіскрових (вибухобезпечних) бетонних покриттів використовують щебінь і пісок з вапняку, мармуру та інших кам'яних матеріалів, що не утворюють іскор при ударах. Крупність щебеню та гравію для бетонних покриттів не повинна перевищувати 0,6 товщини покриття. Витрата крупних заповнювачів складає не менше 0,8 м³ на 1 м³ бетону, а піску – 10...30% об'єму порожнин у щебені або гравії. Міцність бетону на стиск повинна бути не меншою

20 МПа.

Для монолітних високоміцних безшовних підлог ефективним є застосування *литих бетонів* з добавками суперпластифікаторів і *самоущільнювальних бетонів* (Self-Compacting Concrete SCC), які ущільнюються під дією власної маси навіть у густоармованих конструкціях. Бетонна суміш для самоущільнювального бетону характеризується низьким водоцементним відношенням (0,35...0,4) при високому показнику легкоукладальності (розплив конуса – до 70 мм).

Міцність матеріалу, що одержують, досягає до 100 МПа. До переваг цього бетону можна віднести також високу якість поверхні, що не вимагає додаткової обробки. Характерні склади самоущільнювального бетону, що застосовуються в різних країнах, кг/м³: вода – 160...190, поргландцемент – 280...530, мінеральний наповнювач – 70...240, дрібний заповнювач – 750...930, крупний заповнювач – 680...740, добавка – суперпластифікатор (зазвичай полікарбоксилатного типу) – 2...5.

Для досягнення високих експлуатаційних характеристик самоущільнювального бетону висувають жорсткі вимоги до вихідних матеріалів, їх гранулометричного складу, наявності мікронаповнювача. Застосування суперпластифікаторів нового покоління дозволяє не тільки істотно збільшити пластифікуючий ефект, але і суттєво збільшити його тривалість у порівнянні з тим, що досягається традиційними суперпластифікаторами.

Висока якість бетонних підлог досягається також вакуумуванням, яке дозволяє забезпечувати високі фізико-механічні характеристики поверхневого шару. За цією технологією бетонна суміш ущільнюється вібрацією, а потім надлишок води видаляється за допомогою вакуумного агрегату та відсмоктувальних матів. При цьому бетон набуває достатню міцність для обробки поверхневого шару заглажувальними машинами. Орієнтовні склади бетонних підлог, що одержують методом вакуумування наведені в табл.6.5.

Для армування бетонних підлог використовують сітки зі сталеві арматури або дисперсне армування сталеві чи пропіленою фіброю. Досить часто застосовується комбіноване армування, коли крім арматурних сіток у бетон додають фібру.

Кількість введеної в бетон фібри в більшості випадків коливається від 0,5 до 2% за об'ємом. Введення в бетон сталеві фібри в кількості 1...1,5% за об'ємом збільшує його міцність на розтяг до 100%, міцність на згин на 150...200%, міцність на стиск підвищується на 10...25%.

Таблиця 6.5

Орієнтовні склади бетонів при улаштуванні бетонних підлог методом вакуумування

Проектна міцність бетону на стиск, МПа	Водоцементне відношення після вакуумування	Частка піску у суміші заповнювачів	Витрата матеріалів, кг на 1 м ³					
			Цемент марок		Пісок з модулем крупності менше 2	Щебінь крупністю 20 мм	Вода	
			400	500			до вакуумування	після вакуумування
20	0,72	0,43	255	-	835	1110	215	185
	0,72	0,43	245	-	850	-	205	175
	0,72	0,43	250	-	-	1120	210	180
	0,72	0,43	235	-	-	-	200	170
	0,82	0,44	-	225	870	1100	215	185
	0,82	0,44	-	215	880	-	205	175
	0,82	0,44	-	220	-	1110	210	180
	0,82	0,44	-	210	-	-	200	170
30	0,54	0,41	345	-	765	1100	215	185
	0,54	0,41	325	-	785	-	205	175
	0,54	0,41	335	-	-	1110	210	180
	0,54	0,41	315	-	-	-	200	170
	0,62	0,42	-	300	800	1105	215	185
	0,62	0,42	-	280	820	-	205	175
	0,62	0,42	-	290	-	1115	210	180
	0,62	0,42	-	275	-	-	200	170

Для підвищення міцності та зносостійкості цементобетонних покриттів застосовують нанесення зміцнюючих сухих сумішей на щойно укладений бетон. Найбільш поширені суміші, що включають фракціонований кварц, корунд, метал, а також портландцемент і добавки. Випускаються також кольорові зміцнюючі суміші. Нанесений на бетон сухий зміцнювач загладжують за допомогою затирочних машин.

Для захисту, знепилювання й зміцнення бетонних підлог застосовують також різні рідкі, переважно полімерні суміші, що наносяться на свіжий бетон. Такі суміші сприяють збереженню

вологи в бетоні в період набору міцності, захищають поверхню покриттів від проникнення води і масел, утворюючи плівку, що герметизує поверхневі пори і тріщини.

Поряд з підлогами зі зміцненим верхнім шаром бетону широко поширені бетонні підлоги з полімерними покриттями – *наливні підлоги*. Для наливних підлог бетонне покриття служить основою, яка має бути очищено і просушено. Для поліпшення зчеплення бетону з полімерним шаром він обробляється ґрунтішкою. Застосовують два основних види полімерних покриттів – поліуретанове та епоксидне. Поліуретанові покриття відрізняються високою еластичністю та стійкістю до механічних і хімічних впливів, вони стійкі до перепадів температур. Епоксидні підлоги дещо менш еластичні, зате характеризуються високою стійкістю до дії хімічних речовин.

У виробничих будівлях, де підлоги повинні мати високу ударну міцність і стійкість до стирання, наприклад у металообробних цехах, де внутрішньоцеховий транспорт рухається на гусеничному ході застосовують *металоцементні покриття*. Вони складаються з нижнього шару цементно-піщаного розчину марки 400 і верхнього – М500 із суміші сталеві стружки, цементу і води не менше 20 мм товщиною. Сталеву стружку подрібнюють на бігунах або в кульових млинах, потім знежирюють прокалюванням і просівають на ситі з розміром отворів 1,2 мм. Насипна густина сталеві стружки повинна бути не менше 2000 кг/м³. При виготовленні металоцементних сумішей, цемент і сталеву стружку дозують у співвідношенні за обсягом 1:1. Кількість води підбирають так, щоб рухомість суміші відповідала зануренню конуса 1...2 см.

До різновидів цементних бетонів, що широко застосовуються для влаштування підлог у виробничих і громадських будівлях насамперед у вестибюлях, на сходових площадках, у коридорах, санітарних вузлах належать *мозайчні бетони*. Їх виготовляють із застосуванням білого, кольорового або звичайного розбіленого портландцементу і крихти з твердих порід (найчастіше мармуру), які піддаються шліфуванню, мають границю міцності при стиску не менше 60, 80 і 100 МПа

6. Опоряджувальні бетони і розчини. Бетони для підлог

відповідно для покриттів марок М200, М300, М400. Розмір кам'яної крихти повинен бути 2,5 ... 15 мм: крупної (МК) 10...15, середньої (МС) 5...10, дрібної (ММ) 2,5...5 мм. Крихта не повинна містити пилюватих та глинистих домішок і зерен, що легко руйнуються. Твердість крихти повинна відповідати твердості покриття, інакше його якість буде знижуватися внаслідок нерівномірного стирання.

Рекомендується використовувати крихту з водопоглинанням в межах 12...16%, при більш низькому водопоглинанні погіршується її зчеплення з цементним каменем, при більш високому – здатність до шліфування.

Крім кам'яної крихти для деяких мозаїчних сумішей застосовують кварцовий пісок. Для розбілювання звичайного сірого цементу вводять порошок (крупність зерен менше 1,5 мм) з білих гірських порід, границя міцності яких при стиску не менше 20 МПа, у кількості 20...40% маси цементу. Вибираючи склад мозаїчної суміші, виходять з умови створення після обробки поверхні, що містить 75...80% кам'яних заповнювачів і 20...25% цементного каменю. Кількість крупної крихти зазвичай не менше 0,8 м³ на 1 м³ мозаїчного розчину, а обсяг дрібної крихти або піску, що додається, повинен на 10...30% перевищувати обсяг пустот крупного заповнювача.

Склад мозаїчних сумішей залежить від класу бетону за міцністю; орієнтовно він може бути наступним, мас.ч .:

Міцність мозаїчного бетону на стиск у віці 28 діб, МПа

Портландцемент	20	30	40
Вода	1	1	1
Пісок	0,65	0,5	0,4
Крихта	2	1,4	1
	3,4	2,4	1,7

Рухомість мозаїчної суміші відповідає осадці конуса 2...4 см.

Колір кам'яної крихти, співвідношення її дрібної і крупної фракцій, необхідні кількість і вид пігментів вибирають залежно від заданого кольору і тону покриття.

Виготовлення мозаїчного монолітного покриття включає укладку спочатку жорсткого цементно-піщаного розчину товщиною 20...25 мм, потім лицьового мозаїчного шару, який після затвердіння шліфують мозаїчно-шліфувальними машинами. Під час тверднення повинні бути забезпечені сприятливі умови для запобігання швидкого видалення вологи з бетону. Для цього зазвичай через 2 доби після укладання поверхню мозаїчної підлоги засипають шаром тирси не менше 30 мм і протягом 4...7 діб періодично зволожують. До обробки поверхні мозаїчного покриття приступають після досягнення ним такої міцності, при якій кам'яна крихта не викришується. Обробка включає операції обдирання (для видалення верхнього шару цементного каменю і оголення заповнювача), шліфування та полірування.

Крім звичайних влаштовують *набірно-мозаїчні облицювання*, що імітують декоративні гірські породи. Облицювання набирають з окремих шматків і крихти природного каменю різних порід заданого кольору і форми та укладають за малюнком на цементно-піщаному розчині. Затверділе покриття шліфують. При влаштуванні такої підлоги заповнювач з декоративного каменю та цементно-піщаний розчин, що його зв'язує, повинні бути рівномірними, інакше підлога при експлуатації буде нерівномірно стиратися.

Художньо-монументальна мозаїка набирається з окремих шматочків смальти, бою керамічних плиток, декоративного каменю. Вона виконується за спеціальними малюнками методами прямого і зворотного набору. При прямому наборі елементи мозаїки закріплюють цементним розчином або спеціальними мастиками на поверхні, що облицюється, на яку попередньо нанесений малюнок. Зворотний набір відрізняється тим, що елементи мозаїки набирають за малюнком і укладають лицьовою поверхнею донизу, приклеюючи їх до паперу або картону клейстером.

Отриману мозаїчну карту перевертають і закріплюють цементним розчином на оброблюваній поверхні, шліфують і полірують.

Полімерцементні бетони. Позитивними особливостями полімерцементних бетонів і розчинів, що сприяють їх широкому застосуванню для безшовних покриттів підлог є висока тріщиностійкість, стійкість до ударних впливів і стирання. З полімерцементних сумішей, що застосовуються для влаштування підлог у житлових, громадських і виробничих будівлях, найбільше застосування знаходять *полівінілацетатцементні та латексцементні композиції*. Модифікуючими полімерними добавками у цих композиційних матеріалах є дисперсії полівінілацетату та латексів. Стійкість проти коагуляції (злипання) зважених у водних дисперсіях частинок полімерів досягається введенням добавок емульгаторів – полімерних колоїдів або ПАР, що утворюють на поверхні частинок екрануючі оболонки або надають їм однакові електричні заряди.

Полівінілацетатна дисперсія (ПВАД) відноситься до термопластів і містить близько 50% твердих частинок. Додатково в неї вводять пластифікатор – дибутилфталат (близько 15%). Захисним колоїдом служить полівініловий ефір.

З латексів водних дисперсій синтетичних каучуків (еластомерів) поширені латекси бутадієнстирольного, хлоропренового, дивінілстирольного каучуків. Для запобігання коагуляції при змішуванні латексів з цементом або іншими в'язучими матеріалами в їх склад вводять стабілізатори (гідрофільні колоїди, електроліти). Підвищення стійкості латексів проти коагуляції обумовлюється підвищенням дзета-потенціалу на поверхні розділу латексна частинка-вода.

Дисперсії термопластів і еластопластів у цементно-полімерні системи вводяться зазвичай в кількості 5...20% від маси цементу.

Основний напрямок застосування полімерцементних розчинів і бетонів – улаштування підлог приміщень з

інтенсивним рухом людей (вестибюлі видовищних споруд, магазини), транспорту на гумових шинах та підвищеними вимогами до чистоти та запилення. Вид полімерної добавки залежить від особливостей експлуатації покриттів: при впливі води та водних розчинів доцільна добавка латексу, при дії масел і нафтопродуктів віддають перевагу добавці полівініацетатної дисперсії (ПВАД). Рекомендуються такі склади полімерцементних бетонів для покриття підлог, мас.ч. : портландцемент М 400 або М 500 –100; ПВАД або стабілізований латекс СКС-65 ГП – 15...20; пісок –140...200; кам'яна крихта або щебінь – 260...350; лугостійкі пігменти – 5...10 см; вода – до забезпечення осадки конуса бетонної суміші. З бетонів, виготовлених із сумішей наведених складів, допускається виконувати покриття зі стираністю не більше 0,8 г/см², водопоглинанням не більше 2%, коефіцієнтом розм'якшення 0,6.. 0,7 (для бетону на ПВАД) та 0,8...0,9 (для бетону на латексі СКС-65 ГП) при міцності на стиск 25...30 МПа.

При приготуванні полімерцементних бетонів спочатку заливають полімерну дисперсію і воду, додають сухі пігменти, перемішують 3...4 хв і вводять цемент. Після додаткового перемішування тривалістю 2...3 хв у полімерцементне тісто вводять заповнювач і суміш перемішують знову до досягнення необхідної однорідності. Приготовану суміш слід використовувати протягом 2...3 год.

Для ґрунтування основ використовують розбавлену полімерну дисперсію або низьков'язку полімерцементну композицію.

Поряд з мінеральними заповнювачами в полімерцементних сумішах для покриття підлог застосовують тирсу. Склади полімерцементнотирсових сумішей, мас.ч. : портландцемент – 1; полівінілацетатна дисперсія – 0,1...0,2;

тирса – 0,1...0,2; пігменти – 0,02...0,05; вода – 0,3...0,5. Консистенція сумішей за зануренням конуса – 3...3,5 см. Тверднення покриттів з добавкою ПВАД протягом трьох діб здійснюється у вологих, а потім в повітряно-сухих умовах. Покриття з добавкою латексу СКС-65 тверднуть в повітряно-сухих умовах з періодичним зволоженням поверхні.

Поряд з розчиновими і бетонними сумішами для влаштування тонкошарових (2...4 мм завтовшки) покриттів підлог застосовують полімерцементні мастики (шпаклівки). До нанесення мастичного покриття основу ґрунтують і після висихання ґрунтовки через 2...4 год наносять шпаклювальний шар, який після затвердіння шліфують.

Найбільш загальну схему механізму модифікації цементних систем полімерними дисперсіями запропонував І.Охама, хоча є значна кількість досліджень, в яких зроблені спроби запропонувати інші механізми взаємодії цементних систем з полімерними добавками. Відповідно до цієї схеми виділяють три фази тверднення полімерцементних сумішей:

1. Диспергування полімерних частинок в цементному тесті і осідання їх на поверхні цементного гелю і частинок цементу, що не прореагували;
2. Заповнення полімерними частинками капілярних пор, їх коагуляція з утворенням ущільненого шару;
3. Зв'язування частинок полімеру на продуктах гідратації цементу в безперервні плівки або мембрани і утворення з цементним гелем єдиної матричної фази.

Кількість полімеру, що створює безперервну фазу, визначається в основному величиною частинок. Так, для латексу, що має розмір часток 0,8...1 мкм оптимальне полімерцементне відношення (П/Ц) дорівнює 0,1, а для полівінілацетату з величиною частинок 2...5 мкм П/Ц = 0,15...0,2.

Полімерцементні суміші готують на звичайному змішувальному обладнанні. Укладають їх за температури вище 5°C і нижче 30°C . При введенні добавок полімерних латексів оптимальні властивості розчинів і бетонів досягаються при поєднанні вологого і сухого витримання. При такому комбінованому режимі враховується необхідність підвищеної вологості для оптимального тверднення цементу та забезпечення певної витримки у сухих умовах для оптимального тверднення полімерної фази. Тривалість тверднення модифікованих розчинів і бетонів може бути прискорена нагріванням, проте пропарювання не рекомендується.

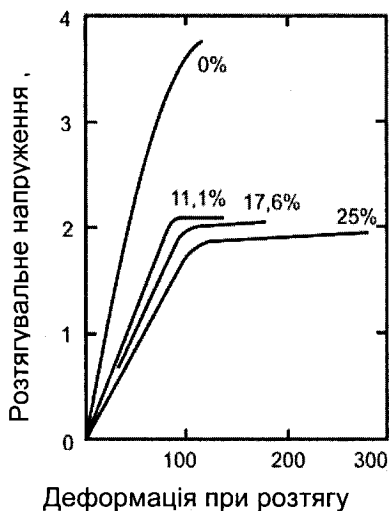


Рис. 6.3. Криві "деформації - напруження розтягу" при різному вмісті полімерної добавки для бетону, модифікованого латексом бутадієнстирольного каучуку (за даними І.Охами)

Легкоукладальність полімерцементних сумішей залежить від виду та кількості полімерної добавки. Так, введення в розчини полівінілацетатної дисперсії до 8% надає пластифікуючу дію, при більшій кількості в'язкість сумішей зростає.

У полімерцементних бетонах і розчинах молекули полімеру покривають частинки цементного каменю, притягуючись до них силами адгезії. При розтягуванні півки полімеру, між якими діють сили міжмолекулярного зчеплення, активно включаються в роботу і у кілька разів

підвищують міцність на розтяг цементного розчину або бетону.

Залежно від типу полімеру і полімер – цементного відношення для модифікованих бетонів змінюються деформації розтягування, модуль пружності і коефіцієнт Пуассона (рис.6.3), (табл.6.6).

Таблиця 6.6

Модуль пружності і коефіцієнт Пуассона
модифікованих бетонів

Тип бетону	Вміст полімера від маси цементу	модуль пружності при стиску, $\times 10^4$ МПа	Коефіцієнт Пуассона
Немодифікований	0	2,11	0,17
Модифікований поліакриловим ефіром	0,05	2,27	0,16
	0,1	2,36	0,17
	0,15	2,30	0,17
	0,2	2,24	0,17
Модифікований бутадієнстирольним латексом	0,05	2,28	0,16
	0,1	2,43	0,18
	0,15	2,42	0,18
	0,2	2,02	0,18
Модифікований полівінілацетатною дисперсією	0,05	1,9	0,16
	0,1	1,79	0,19
	0,15	1,35	0,24
	0,2	1,0	0,29

У порівнянні зі звичайними бетони цього виду характеризуються підвищеною міцністю зчеплення з різними основами. Майже десятикратне збільшення зчеплення зі звичайним цементним розчином спостерігається у розчині, що модифікований латексом синтетичного каучуку, при полімерцементному відношенні 0,2. Приблизно в стільки ж разів зростає і опір удару. Опір стиранню збільшується в 20...50 разів у порівнянні з немодифікованим розчином.

Більшість модифікованих бетонів втрачає до 50% і більше міцності при температурі, що перевищує 50° С. Найбільш значне зниження міцності має місце при температурі за якою відбувається зміна структури полімерів (як правило, 80...100° С). При температурі 100...150° С міцність полімерцементних бетонів практично не відрізняється від міцності немодифікованих бетонів.

Бетони на основі магнезіальних і гіпсових в'яжучих. До бетонів на магнезіальних в'яжучих, що застосовуються для покриттів підлог у будівлях різного призначення відноситься *ксилоліт*. Ксилолітові покриття бувають еластичними і жорсткими, одношаровими і двошаровими. Еластичні ксилолітові покриття виготовляють із суміші магнезіального в'яжучого і тирси, а в жорсткі покриття додають кам'яні заповнювачі. Останні застосовують у приміщеннях з інтенсивним пересуванням людей і безрейкового транспорту.

В'яжучими в ксилолітових розчинах є каустичний магнезит і каустичний доломіт. *Каустичний магнезит* – порошок, що складається переважно з оксиду магнію, його отримують помелом магнезиту, випаленого при 700...800° С. *Каустичний доломіт* - порошок з оксиду магнію і карбонату кальцію; його отримують помелом доломіту, випаленого при 650...750° С.

Для замішування каустичних магнезиту і доломіту застосовують розчини хлориду і сульфату магнію, сульфату заліза. Найбільшої міцності досягають, використовуючи розчин хлориду магнію з вмістом $MgCl_2$ не менше 45% і густиною 1,15...1,20 г/см³. Розчин хлориду магнію можна приготувати нейтралізуючи соляну кислоту каустичним магнезитом. З цієї

ж метою застосовують карналіт – природний мінерал, що являє собою подвійну сіль водних хлоридів калію та магнію.

Каустичний магнезит, є порівняно високоміцною швидкотверднучою в'язкою речовиною. При перемішуванні з водним розчином хлориду магнію густиною 1,2 г/см³ через 1 добу твердіння його міцність на розтяг складає не менше 1,5 МПа, а через 28 діб – 3,5...4,5 МПа, міцність на стиск – 40...50 МПа і більше. Початок тужавлення магнезитового тіста повинен наступати не раніше 20 хв, кінець – не пізніше 6 годин після замісу.

Каустичний доломіт має меншу міцність (10...30 МПа). Замість 1 кг каустичного магнезиту витрачається приблизно 1,7 кг каустичного доломіту.

Основним заповнювачем ксилолітової суміші є деревна тирса. Як добавки вводять тальк, азбест, кварцовий пісок, кам'яне борошно і т.п.

Найчастіше використовують тирсу хвойних порід, що одержують при поздовжньому розпилюванні лісу. Крупність тирси для верхнього шару покриття повинна бути до 2,5 мм, для нижнього – до 15 мм. Не рекомендується використовувати тирсу твердих порід дерев, тирсу вологістю більше 20% і заражену грибами.

Для отримання кольорових покриттів у ксилолітові суміші додають лугостійкі мінеральні пігменти в кількості 3...5 % маси сухих складових.

Склади ксилолітових сумішей наведені в табл.6.7. При підвищених вимогах до чистоти приміщення і зовнішнього вигляду підлог у ксилолітову суміш додають тальк близько 6% об'єму магнезиту та тирси. Міцність покриття при ударі може бути істотно підвищена при введенні в ксилолітову суміш до 25% об'єму магнезиту азбесту 5-го або 6-го сорту з волокнами 1,5...2 мм довжиною.

Таблиця 6.7

Склади ксилолітових сумішей

Покриття	Склади суміші (в сипучому стані), об'ємн.ч.		Густина розчину хлориду магнію для замішування ксилолітової суміші
	Еластичне покриття (магнезит: тирса) для напівтепліх підлог	Тверде покриття (магнезит: тирса: пісок) для холодних підлог	
Одношарове або верхній шар двошарового покриття з неінтенсивним рухом	1: 2	1: 1,4: 0,6	1,18
Те ж, у місцях з інтенсивним рухом	1: 1,5	1: 1: 0,5	1,20
Те ж, у місцях з особливо інтенсивним рухом (сходові майданчики, головні проходи і т.п.)	Не застосовується	1: 0,7: 0,3	1,24
Нижній шар двошарового покриття	1: 4	Не застосовується	1,14

Примітка. Для забарвлення в ксилолітову суміш лицьового шару покриття додають пігмент в кількості 3...4% об'єму магнезиту та тирси.

Ксилолітову суміш виготовляють в розчинозмішувачах, продуктивність яких вибирають такою, щоб суміш була витрачена протягом не більше 40 хв після її замішування.

Розчин хлориду магнію додається до суміші до тих пір, поки її рухомість стане 2... 3 см за зануренням стандартного конуса. Виготовляючи ксилолітову суміш і укладаючи її, слід враховувати кородуючу дію розчину хлориду магнію на металеве обладнання та деталі. Необхідного зчеплення ксилолітового покриття з основою досягають ґрунтовкою

сумішшю каустичного магнєзиту і розчину хлориду магнію густиною 1,06...1,07 г/см³ у співвідношенні 1:4 за масою. Ксилолітову суміш укладають до початку тужавлення розчину, використаного для ґрунтовки основи. Ксилолітові покриття обробляють циклюванням і шліфуванням. Щоб отримати глясову поверхню, ксилолітові покриття протирають олійними речовинами.

У будівництві є позитивний досвід застосування для влаштування покриттів підлог розчинів на основі гіпсових і ангідритових в'язучих. Поризований гіпсовий розчин (*pinoginc*) може бути використаний в якості нижнього шару покриттів, що укладається на плити перекриття товщиною 50...70 мм. Через 2...3 години після набору початкової міцності піногіпсом укладається верхній шар із *gincota ангідритопіщаних сумішей*. Для підвищення водостійкості і міцності такі суміші виготовляються з застосуванням гіпсоцементнопуццоланових і гіпсоцементношлакових в'язучих. Застосування пластифікуючих добавок дозволяє отримувати розчинів суміші з достатньою текучістю при водотвердому відношенні до 0,35. Товщина гіпсопіщаної стяжки становить 20...30 см, міцність при стиску затверділого розчину – не менше 10 МПа.

При застосуванні ангідритових в'язучих до складу розчинів вводять добавки-активізатори: вапно (2...5%), основний доменний шлак (3 ... 8%), сульфат натрію (0,6%) та ін. Міцність затверділого розчину з ангідритного в'язучого на стиск досягає 20 МПа, на розтяг при згині 6 МПа. При застосуванні природного ангідриту відпадає необхідність випалу. Сировину при переробці на в'язуче піддають лише подрібненню, сушінню та помолу. Поряд з ангідритовим може застосовуватися високотемпературне гіпсове в'язуче - естріх-гіпс. Наявність у естріх-гіпсі певної кількості вапна у вигляді оксиду кальцію дозволяє не вводити у в'язуче інші добавки, що активізують тверднення .

7. ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНІ БЕТОНИ

До теплоізоляційних належать ніздрюваті і легкі бетони на пористих заповнювачах, що мають низьку теплопровідність (λ) і придатні для теплової ізоляції конструкцій і споруд. Відповідно до чинної класифікації будівельних теплоізоляційних матеріалів вони можуть відповідати першому ($\lambda \leq 0,0650$ Вт/(м⁰С), другому ($\lambda = 0,06...0,115$ Вт/(м⁰С)) або третьому ($\lambda = 0,115...0,1750$ Вт/(м⁰С)) класам

Середня густина теплоізоляційних бетонів має бути не більше 500 кг/м³

Властивості теплоізоляційних бетонів, що визначають раціональні області їх застосування, обумовлені видом і властивостями вихідних матеріалів і особливостями структури, на якій істотно позначаються спосіб поризації, умови твердіння та ін.

7.1. Ніздрюваті бетони

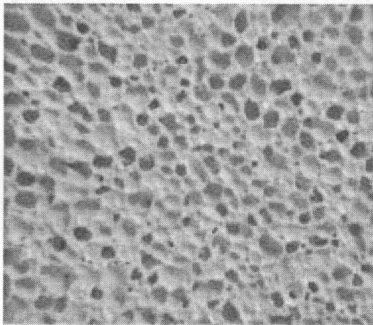


Рис. 7.1. Структура ніздрюватого бетону

Бетони цього виду являють собою штучні пористі матеріали з дрібнозернистою комірчастою структурою (рис.7.1), що одержують в результаті поризації і твердіння раціонально підбраної однорідної сировинної суміші, яка складається з в'язучого, кремнеземистого компоненту, пороутворювачів і добавок.

У 1889 р чеським дослідником Гоффманом, який застосував для спучування розчинів вуглекислий газ, вперше був запропонований газобетон. У 1914 р Аулсворт і Дайер (США) отримали патент на використання порошоків алюмінію та цинку для утворення бульбашок водню в цементному тісті, заклавши принципові основи сучасної технології газобетону. У 1923 р данський інженер Байер винайшов пінобетон.

7. Теплоізоляційні бетони

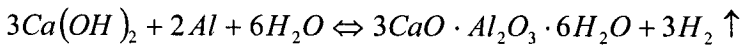
В наш час інтенсивно розвивається виробництво як газо-, так і пінобетонів автоклавного і неавтоклавного твердіння.

Ніздрюваті бетони класифікують за функціональним призначенням, способом поризації, видом в'язучої речовини, видом кремнеземистого компонента і способом тверднення

До *теплоізоляційних* ніздрюватих бетонів належать бетони, що мають середню густину не більше 500 кг/м^3 . Бетони з середньою густиною $500\text{...}900 \text{ кг/м}^3$ входять до групи *конструкційно-теплоізоляційних*, $1000\text{...}1200 \text{ кг/м}^3$ - *конструкційних*.

Найважливішими в технології ніздрюватих бетонів є спосіб поризації та умови тверднення. Вони істотно впливають як на особливості структури бетонів, так і на їх властивості.

Газобетон утворюється при поризації бетону газом, що виділяється в результаті введення в суміш газоутворювача. Найбільш поширеним газоутворюючим компонентом є алюмінієва пудра. Введення пудри забезпечує початок газовиділення в лужному середовищі через $1\text{...}2$ хв. Поряд з пудрою, що вводиться в суміш у вигляді водної суспензії, застосовують алюмінієву пасту. Газоутворення проходить за реакцією:



В результаті хімічної реакції з 1 г алюмінію виділяється при нормальних умовах 1,254 л водню, при 50°C об'єм водню становить 1,48л. Для виробництва газобетонів використовують пудру марки ПАП-1 з тонкістю помелу $5000\text{...}6000 \text{ см}^2/\text{г}$. Витрата алюмінієвої пудри залежно від густини бетону становить $0,25\text{...}0,6 \text{ кг/м}^3$. Відомі також інші газоутворювачі, які не отримали широкого застосування: феросиліцій (FeSi_2), пергідроль (H_2O_2), карбід кальцію (CaC_2), цинкова пудра (Zn).

Спучування ніздрюватобетонної маси відбувається в результаті виділення газу на поверхні рівномірно розподілених мікрочастинок газоутворювача у масі, що має достатню пластичну в'язкість для запобігання проривів.

Бажано, щоб тужавлення маси відбувалося відразу після спучування, інакше тиск газу на стінки пор викликає її розтріскування. При недостатній пластичній міцності маси до моменту припинення спучування відбувається її осадка. Якщо ж

суміш тужавіє до завершення процесу спучування, то задана густина газобетону не буде досягнута.

На процес газоутворення впливає велика кількість технологічних факторів: в'язкість суміші, дисперсність алюмінієвої пудри і її вміст, температура, хімічний склад середовища.

При поризації бетону піною, утвореною добавками ПАР, виготовляють *пінобетон*.

До основних піноутворювачів, що застосовуються для виготовлення пінобетону, відносяться клеєканіфольні, сапонінові, білкові піноутворювачі, а також піноутворювачі на основі синтетичних ПАР.

Основними фізичними властивостями технічної піни, що характеризують її якість, є кратність і стійкість.

Кратність піни (K_n) визначається за формулою (7.1) і повинна бути не менше 6...10 для конструкційних, 8...20 – конструкційно-теплоізоляційних і 15...40 – теплоізоляційних пінобетонів:

$$K_n = \frac{V_{\text{піни}}}{V_{\text{п.у}}} = \frac{\rho_{\text{п.у}}}{\rho_{\text{піни}}}, \quad (7.1)$$

де $V_{\text{піни}}$, $V_{\text{п.у}}$, $\rho_{\text{піни}}$ і $\rho_{\text{п.у}}$ – відповідно об'єм і густина піни та піноутворювача.

Стійкість піни характеризується коефіцієнтом стійкості в цементному тісті (C), який підраховується за формулою:

$$C = \frac{V_{\text{ц.т}}^{\text{пор}}}{V_{\text{ц.т}} + V_{\text{піни}}}, \quad (7.2)$$

де $V_{\text{ц.т}}^{\text{пор}}$ – об'єм поризованного цементного тіста, мл; $V_{\text{ц.т}}$ – об'єм цементного тіста, мл, $V_{\text{піни}}$ – об'єм піни.

Технічну піну можна вважати задовільною при $C = 0,8...0,85$, високої якості при $C \geq 0,95$.

Для отримання стійкої піни поряд з добавками піноутворювачами в ряді випадків необхідні ефективні стабілізатори. Ними можуть бути високомолекулярні сполуки, мила та інші речовини, що дають міцні плівки. У піноутворювачі на

7. Теплоізоляційні бетони

основі клеєканіфольного мила як стабілізатор використовують столярний або міздровий клей, на основі смоли деревної омиленої (СДО) – гідроксид кальцію.

Чим вищий коефіцієнт стійкості піни, тим менший її об'єм (і відповідно об'єм піноутворювача), необхідний для отримання пінобетону необхідної густини. Кратність і стійкість піни знаходяться в певному взаємозв'язку. При отриманні піни досить високої кратності важливо зберегти необхідне значення її стійкості.

В'яжучими для виробництва ніздрюватих бетонів служать як клінкерні, так і безклінкерні (шлаколуужні та ін.) цементи, вапно, гіпс.

При використанні вапняно-кремнеземистих в'язучих ніздрюваті бетони називають *газо-* або *піносилікатами*.

Вид в'язучого вибирають з урахуванням умов твердіння та структуроутворення ніздрюватих бетонів. При твердінні в нормальних умовах можливе використання алітових низько- і середньоалюмінатних цементів, шлаколуужних в'язучих. Для конструкційно-теплоізоляційних бетонів рекомендуються цементи з питомою поверхнею 250...300 м²/кг, для теплоізоляційних – 300...400 м²/кг. Початок тужавлення цементу повинен наступати не пізніше 2 год, а кінець не пізніше 4 год після замішування. Небажане застосування цементів з добавками трепелу, глієжів, трассів, опоки. У виробництві ніздрюватих бетонів, які тверднуть при автоклавній обробці, широко застосовують вапняно-шлакові і вапняно-зольні в'язучі, гідравлічна активність яких особливо проявляється з підвищенням температури і тиску водяної пари. Автоклавна обробка дає можливість використовувати як сировину інертні чи малоактивні при нормальному твердінні кислі, низькоглиноземисті гранульовані та відвальні шлаки і золи.

Кремнеземистим компонентом служить, як правило, мелений кварцовий пісок або зола ТЕС. Застосовують також доменні та інші металургійні шлаки, трепел, діатоміт, опоку та ін. Мелений пісок повинен містити не менше 90% SiO₂. У порівнянні з кварцовим піском зола-винесення має більш високу активність, вимагає значно менших витрат на додаткове подрібнення і дозволяє отримати бетон з меншою середньою густиною. Зола повинна містити не менше 50% склоподібних і оплавлених частинок і не більше 5% незгорілих вуглецевих частинок.

Отримання газо- і пінобетону включає помел та змішування сировинних компонентів, поризацію і формування, витримку і тепловологісну обробку виробів.

Газобетонні вироби виготовляють із застосуванням литтєвої, вібраційної та різальної та технології. При *литтєвій технології* вироби формують з рухомих сумішей, що містять до 50...60% води від маси сухих компонентів. Такі суміші часто мають недостатню газоутримуючу здатність, що погіршує структуру бетону.

Вібраційна технологія дозволяє зменшити водотвердне відношення сумішей і інтенсифікувати процес спучування за рахунок тиксотропії і прискорення газовиділення. Позитивний ефект досягається при застосуванні вібрування суміші спочатку в процесі приготування її в віброзмішувачах, а потім після заливки в формах на вібромайданчиках.

При застосуванні на заводах ніздрюватих бетонів *різальної технології* формування виробів відформований масив, що має певну мінімальну міцність, розрізається на плити або блоки відповідних розмірів, що потім надходять на тепловологісну обробку.

Традиційна технологія пінобетону включає приготування піни, розчинової суміші і пінобетонної маси. Реалізація такої технології здійснюється в пінобетонозмішувачах, які складаються з двох або трьох барабанів (рис.7.2, а). Піну при цьому готують інтенсивним перемішуванням водного розчину піноутворювача.

Поризація бетонної суміші попередньо приготованою піною може здійснюватися також методом *сухої мінералізації піни* (рис.7.2, б), при якому низькократна піна мінералізується сухими компонентами у міру їх поступового додавання до піномаси при одночасному перемішуванні в змішувачі. При цьому методі пінобетонну суміш можна приготувати як в окремому піногенераторі, так і у високошвидкісному змішувачі. Швидка адсорбція води сухими компонентами призводить до стабілізації пінобетонної суміші. Цей метод дозволяє знизити водотверде відношення, зміцнити міжпорові перегородки і отримати пінобетон з більш високим коефіцієнтом конструктивної якості.

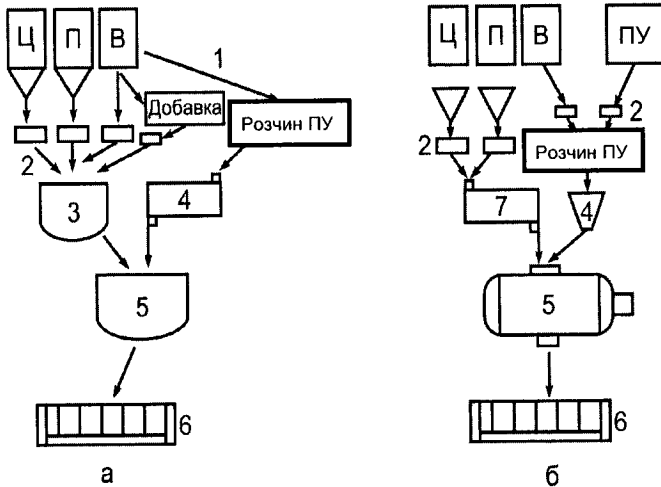


Рис.7.2. Технологічні схеми виробництва пінобетонних виробів:
 а - традиційний метод; б - метод сухої мінералізації;
 1 - бункери сировинних матеріалів (цементу (Ц), піску (П), води (В));
 2 - дозатори; 3 - змішувач для приготування розчинової суміші;
 4 - піногенератор; 5 - змішувач для приготування пінобетонної суміші;
 6 - форма; 7- змішувач сухих компонентів; ПУ - піноутворювач

Отримання пінобетонної суміші без попереднього приготування піни здійснюють методом *аерування* (рис.7.3), основаним на втягуванні повітря масою, що містить піноутворювач, при швидкісному перемішуванні в змішувачі. Цей метод дозволяє відмовитися від застосування спеціального піногенератора. Істотний вплив на поризацію має початкова рухомість суміші, оптимальна область якої знаходиться у вузькому діапазоні. При цьому важливе значення має вид піноутворювача, швидкість аерування і конструкція змішувача.

У технології ніздрюватих так як і в інших видах бетонів цілеспрямовано покращувати властивості продукції дозволяє застосування ефективних добавок-пластифікаторів, прискорювачів твердіння, гідрофобізаторів, волокнистих добавок. Найбільш високі технічні властивості ніздрюватих бетонів при раціональному використанні в'язучих матеріалів, у тому числі на основі шлаків, зол та інших промислових відходів досягаються при

тепловологісній обробці в автоклавах. Автоклавна технологія в даний час найбільш характерна для газобетонів. Вироби запарюють зазвичай при тиску 0,8...1,2 МПа при загальній тривалості 10...17 год. Поряд з автоклавною обробкою для виробів на основі цементу або доменних шлаків застосовують пропарювання або електропрогрів. За неавтоклавною технологією виготовляють переважно дрібноштучні блоки з пінобетону при підвищеній витраті портландцементу.

Властивостями ніздрюватих бетонів, що визначають їх якість, є густина і міцність. Нормовані показники середньої густини і

міцності на стиск для теплоізоляційних ніздрюватих бетонів (ДСТУ Б В.2.7-45:2010) наведені нижче:

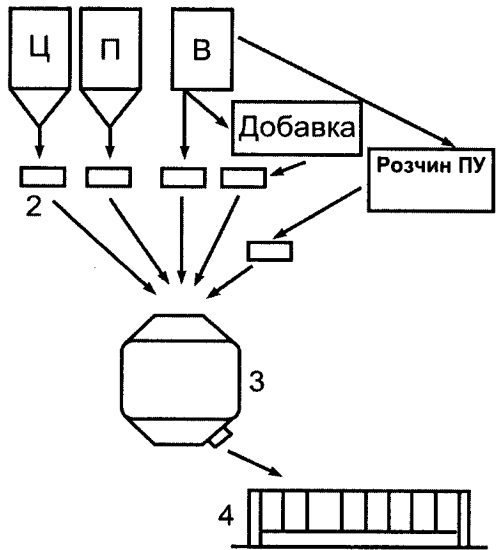


Рис.7.3. Технологічна схема виготовлення пінобетонних виробів з використанням методу аерування бетонної суміші:

1 - витратні бункери сировинних матеріалів (цементу, піску, води); 2 - дозатори; 3 - швидкісний змішувач; 4 - форма для формування пінобетонних виробів
 ПУ - піноутворювач

Марка бетону за середньою густиною	Клас по міцності бетону при стиску	
	Автоклавний бетон	Неавтоклавний бетон
D200	B0,35	B0,35;
D250	B0,5	B0,5
D300	B0,75	B0,75
D350	B1	-

7. Теплоізоляційні бетони

Густина бетонів залежить від густини матеріалу міжпорових стінок і об'єму пор (порожнин), утворених в результаті поризації і водов'язучого відношення.

Міцність ніздрюватих бетонів (f_{cm}) знаходиться в тісній кореляції з його густиною (ρ_6). На практиці для прогнозування міцності цих матеріалів використовують різні емпіричні залежності, наприклад:

$$f_{cm} = A\rho_6^2, \quad (7.3)$$

де A – конструктивний коефіцієнт, величина якого може змінюватися в значних межах.

Підвищення точності прогнозування міцності досягається при врахуванні міцності ($f_{m,n}$) і густини ($\rho_{m,n}$) міжпорового матеріалу бетону. За К.І.Бахтіяровим і А.Т.Барановим залежність між міцністю ніздрюватого бетону і його густиною виражається формулою:

$$f_{cm} = f_{m,n} \left(\frac{\rho_6}{\rho_{m,n}} \right)^3, \quad (7.4)$$

Запропоновані й інші емпіричні формули для розрахунку міцності ніздрюватих бетонів залежно від їх густини.

Границя міцності при стиску зразків ніздрюватого бетону залежить від напрямку стискаючого навантаження. Якщо воно направлене перпендикулярно напрямку заливки, значення міцності на 20...30% вище, ніж тоді, коли навантаження спрямовані паралельно напрямку заливки.

Важливим показником якості ніздрюватих бетонів є показник, що характеризує його однорідність за міцністю:

$$K = \frac{f_{cm}}{f_{ck}} (1 - 3C_V), \quad (7.5)$$

де f_{cm} – середня міцність, МПа, f_{ck} – нормативна міцність бетону, C_V – коефіцієнт варіації міцності.

Величина K для бетону автоклавного твердіння зазвичай є вищою ніж неавтоклавного.

Міцнісні показники ніздрюватих бетонів істотно залежать від вологості. Орієнтовно при вологості бетону 8% коефіцієнт зменшення міцності на стиск становить 0,84, 10% – 0,8, 15% – 0,75 і 20% – 0,7. Відпускна вологість не повинна перевищувати 35% для бетонів марок D200...D400, 30% – для D500, 25% – для бетонів марок D600...D1100 при використанні кварцового піску і 35% – для бетонів марок D600...D1100 на основі інших кремнеземистих компонентів.

Усадка автоклавних ніздрюватих бетонів, виготовлених на основі природнього піску, для марок D400...D1100 не повинна перевищувати 0,5 мм/м та 0,7 мм/м, виготовлених на основі інших кремнеземистих компонентів, а для неавтоклавних бетонів 3 мм/м (рис.7.4). Для бетонів марок D200...D350 усадка при висиханні не нормується. Суттєво зменшити усадочні деформації можна при введенні до складу ніздрюватих бетонів деякої кількості крупних

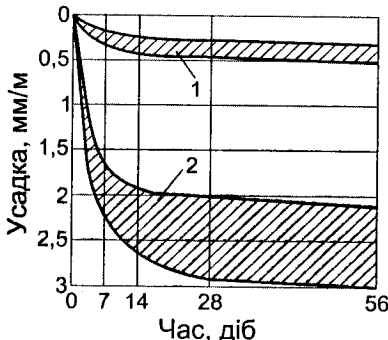


Рис. 7.4. Зміна усадки ніздрюватого бетону в часі:
1 - автоклавний бетон;
2 - неавтоклавного бетону

пористих заповнювачів. Наприклад, заміна 20...25% об'єму кремнеземистого компоненту крупним пористим заповнювачем зменшує усадочні деформації ніздрюватих бетонів на 50...70%.

Для ніздрюватих бетонів характерні порівняно високі значення *сорбційної вологості, паро- та повітряпроникності*. Вони в 5...10 разів більші, ніж для важкого бетону, що обумовлює необхідність застосування захисних покриттів

в огорожувальних конструкціях для оберігання ніздрюватих бетонів від зволоження.

Для бетонів марок D200...D350 значення сорбційної вологості при відносній вологості повітря 75% повинно бути не більше 8%, 97% – 12%.

Для теплоізоляційних ніздрюватих бетонів не нормується морозостійкість. Для конструкційних і конструкційно-

7. Теплоізоляційні бетони

теплоізоляційних бетонів морозостійкість може відповідати маркам F15...F75.

Нормовані значення теплопровідності і паропроникності теплоізоляційних ніздрюватих бетонів залежно від марки за середньою густиною наведені в табл.7.1.

Таблиця 7.1

Теплопровідність і паропроникність ніздрюватих бетонів

Марка бетону за середньою густиною	Теплопровідність, у сухому стані Вт/(м·°C), не більше	Коефіцієнт паропроникності, мг/(м·год·Па), не менше
D200	0,055	0,28
D250	0,065	
D300	0,080	0,26
D350	0,090	0,24

Теплопровідність ніздрюватих бетонів визначається їх вологістю при певній середній густині (табл.7.2).

Коефіцієнт теплопровідності різних ніздрюватих бетонів за однакової густини та вологості може відрізнитися, що пов'язано з видом сировинних матеріалів, що використовуються, і структурними особливостями (співвідношенням відкритої і капілярної пористості, розміром пор, товщиною міжпорових перегородок та ін.).

Таблиця 7.2

Теплопровідність ніздрюватих бетонів Вт/(м·°C)

Середня густина бетону в сухому стані, кг/м ³	Вологість, %				
	0	5	10	15	20
300	0,9	0,13	0,17	0,20	0,24
400	0,10	0,14	0,19	0,23	0,27
500	0,12	0,16	0,21	0,25	0,29

Питома теплоємність ніздрюватих бетонів, що характеризує їх здатність поглинати або віддавати теплоту, становить в середньому 0,84 кДж/(кг·°C). При експлуатаційній вологості газобетону автоклавного тверднення 4...6% в нормальних умовах питома теплоємність становить 1...1,1 кДж/(кг·°C). *Коефіцієнт теплозасвоєння* ніздрюватих бетонів, що характеризує їх теплоакумулюючі властивості, взаємопов'язаний з середньою густиною, теплоємністю, коефіцієнтом теплопровідності та експлуатаційною вологістю. Він коливається в діапазоні 1,4...7,8 кДж/(м²·°C).

При зволоженні і висиханні, замерзанні і відтаванні, нагріванні і охолодженні мають місце температурно-вологісні деформації, які можуть призводити до утворення тріщин і руйнування виробів. Коефіцієнт лінійного розширення (α_0) ніздрюватих бетонів при їх охолодженні і нагріванні від 0 до 100°C приймають $8 \cdot 10^{-5}$.

Ніздрюваті бетони належать до групи вогнестійких матеріалів. Так, пінобетон на портландцементі витримує односторонню дію вогню (800°C) без руйнування протягом 4 год.

Властивості ніздрюватих бетонів поліпшуються з оптимізацією їх пористої структури за рахунок різних технологічних прийомів: застосуванням високоміцних ефективних в'язучих, дисперсним армуванням волокнистими добавками, використанням швидкісних вібро- і гідродинамічних змішувачів.

З теплоізоляційних ніздрюватих бетонів виготовляють різноманітні ефективні вироби для теплоізоляції будівельних конструкцій та теплотехнічного обладнання. Освоєно виробництво і застосування теплоізоляційних плит і блоків марок за густиною D220...D400 з границею міцності при стиску в сухому стані 0,5...1,5 МПа, коефіцієнтом теплопровідності 0,055...0,1 Вт/(м·°C) при відпускній вологості до 10%. Розвивається виробництво *термоблоків* – стінових матеріалів, що являють собою оболонку з піщаного бетону, наповнену мінералізованою цементною піною з середньою густиною близько 150 кг/м³.

Підбір складу ніздрюватого бетону починається з вибору відношення кремнеземистого компонента до в'язучого в суміші (С) (табл.7.3).

Таблиця 7.3

Значення С

В'язуче	Для автоклавного бетону	Для неавтоклавного бетону
Цементне і цементно-вапняне	0,75; 1; 1,25; 1,5; 1,75; 2	0,75; 1; 1,25
Вапняне	3,5; 4; 4,5; 5,5; 6	-
Вапняно-білітове	1; 1,25; 1,5; 2	-
Вапняно-шлакове	0,6; 0,8; 1	0,6; 0,8; 1
Високоосновне зольне	0,75; 1; 1,25	-
Шлаколувне	0,1; 0,15; 0,20	-

7. Теплоізоляційні бетони

Відношення маси кремнеземистого компоненту до маси вапняно-цементного в'язучого визначають розрахунково за формулою:

$$C = C_{\text{ц}}n + C_{\text{в}}(1 - n), \quad (7.6)$$

де $C_{\text{ц}}$ і $C_{\text{в}}$ – відношення маси кремнеземистого компоненту відповідно до маси цементу і вапна (у перерахунку на 100% CaO + MgO); n – частка цементу в в'язучому, яка знаходяться в межах 0,35-0,7 за масою.

Піна за якістю повинна відповідати таким вимогам: вихід пор K не менше 15, коефіцієнт її використання не нижче 0,8.

Розрахунок газоутворювача або водного розчину піноутворювача $P_{\text{п}}$ на заміс виконують за формулою:

$$P_{\text{п}} = \frac{\Pi_{\text{р}}}{\alpha K} V, \quad (7.7)$$

де $\Pi_{\text{р}}$ – пористість, визначена розрахунковим шляхом: α – коефіцієнт використання пороутворювача; K – вихід пор (відношення об'єму піни або газу до маси пороутворювача, л/кг); V – заданий об'єм ніздрюватобетонної суміші.

Таблиця 7.4

Текучість бетонної суміші

Задана середня густина ніздрюватого бетону, кг/м ²	Діаметр розливу суміші по Сутгарду, см		
	на цементному, вапняно-цементному, шлаколужному в'язучому	на вапняному, вапняно-шлаковому і вапняно-білітовому в'язучому	на високоосновному зольному в'язучому
При литтєвому способі формування			
300	38	30	—
400	34	25	25
500	30	23	23
600	26	21	21
При вібраційному способі формування			
500	15	—	—
600	13	—	—

Водотверде відношення (В/Т) має призначатися для кожного складу, виходячи з вимог до текучості і температури суміші, зазначених у табл. 7.4. та 7.5.

Пористість Π_p слід розраховувати за формулою

$$\Pi_p = 1 - \frac{\rho_0}{K_c} (V_{c.c} + B/T), \quad (7.8)$$

де ρ_0 – задана середня густина ніздрюватого бетону в сухому стані, кг/м³; K_c – коефіцієнт збільшення маси ніздрюватого бетону за рахунок зв'язаної води; $V_{c.c}$ – питомий об'єм сухої суміші, л/кг; В/Т – водотверде відношення.

Питомий об'єм сухої суміші необхідно визначати на підставі дослідних замісів і розраховувати за формулою

$$V_{c.c} = \frac{1 + B/T}{\rho_0^{\Phi}} - B/T, \quad (7.9)$$

де ρ_0^{Φ} – фактична середня густина розчинової суміші.

Таблиця 7.5

Температура ніздрюватого бетону

Вид ніздрюватого бетону і в'язучого, що використовується	Температура розчинової суміші, °С, в момент вивантаження у форми	
	при литтєвому способі формування	при вібраційному способі формування
Газобетон на цементі	45	45
Газобетон на вапняно-цементному в'язучому	35	40
Газобетон на вапняно-шлаковому або високо-основному зольному в'язучому	40	45
Газосилікат на основі вапняк-кіпільки або вапняно-білітовому в'язучому	30	40
Пінобетон на цементі	25	—

Як вихідні значення при розрахунках за формулами (7.7) і (7.8) приймають: $K_c = 1,1$; ($\alpha = 0,85$); $K = 1390$ л/кг при використанні алюмінієвої пудри і $K = 20$ л/кг при використанні піни.

Витрати матеріалів на заміс визначають за формулами:

$$P_{\text{сух}} = \frac{\rho_0}{K_{\text{зв}}} V, \quad (7.10)$$

$$P_{\text{в'яз}} = \frac{P_{\text{сух}}}{1+C}, \quad (7.11)$$

$$P_{\text{ц}} = P_{\text{в'яз}} n, \quad (7.12)$$

$$P_{\text{в}} = P_{\text{в'яз}} (1-n), \quad (7.13)$$

$$P_{\text{вф}} = \frac{P_{\text{в}}}{A_{\text{ф}}} 100, \quad (7.14)$$

$$P_{\text{в}} = P_{\text{сух}} V/T, \quad (7.15)$$

$$P_{\text{к}} = P_{\text{сух}} - (P_{\text{ц}} + P_{\text{вф}}). \quad (7.16)$$

де $P_{\text{сух}}$ – витрата матеріалів на заміс, кг; ρ_0 – середня густина ніздрюватого бетону, висушеного до постійної маси, кг/м^3 ; $K_{\text{зв}}$ – коефіцієнт збільшення маси в результаті твердіння за рахунок зв'язаної води (для попередніх розрахунків приймають рівним 1,1); V – заданий об'єм одночасно формованих виробів, збільшений з урахуванням утворення окрайця на 7...10% для індивідуальних форм і 3...5% для масивів, л; $P_{\text{в'яз}}$ – маса в'язучого, кг; $P_{\text{ц}}$ – маса цементу, кг; n – частка цементу в змішаному в'язучому; $P_{\text{в}}$ – маса вапна, що містить 100% CaO , кг; $P_{\text{вф}}$ – маса вапна з фактичним вмістом CaO , кг; $A_{\text{ф}}$ – фактичний вміст CaO у вапні, %; $P_{\text{в}}$ – маса води, кг; $P_{\text{к}}$ – маса кремнеземистого компоненту, кг.

На підставі відповідності результатів випробувань зразків дослідних замісів ніздрюватобетонних сумішей необхідним показникам за середньою густиною і міцністю при стиску ніздрюватого бетону призначають робочий склад ніздрюватобетонної суміші. Після виробничої перевірки робочого складу суміші складають таблиці витрат матеріалів на 1 м^3 бетону і на заміс, а також технологічні карти виробництва виробів. При проведенні дослідів з підбору складів теплоізоляційних ніздрюватих бетонів для отримання розрахункових залежностей на

реальних матеріалах витрати матеріалів для пробних замісів знаходяться в межах, наведених в табл. 7.6.

Для розрахунку матеріалів на заміс бетонозмішувача приймають наступні значення В/Т: для ніздрюватого бетону на піску – 0,5, золі-винесення – 0,6; при використанні вібротехнології з застосуванням суперпластифікаторів типу С-3 на піску – 0,3, на золі – 0,4.

Таблиця 7.6

Усереднені витрати матеріалів

Вид ніздрюватого бетону	Густина бетону, кг/м ³	Витрата, кг/м ³					
		вапна-кипільки активністю 70%	цементу	піску меленого	золі-винесення	доменного шлаку	гіпсу
Газосилікат	350	72	-	247	-	-	3
	500	110	-	345	-	-	5
Газозолосилікат	350	72	-	-	247	-	3
	500	110	-	-	345	-	5
На цементно-вапняному в'язучому з використанням піску	350	36	36	247	-	-	3
	500	90	90	275	-	-	4
Те ж з використанням золи-виносу	350	49	80	-	190	-	3
	500	70	115	-	275	-	4
Газошлакобетон	350	25	-	145	-	140	1
	500	35	-	240	-	180	1
Газобетон	350	-	140	179	-	-	2
	500	-	220	236	-	-	3

7.2. Легкі бетони на пористих заповнювачах

Легкі бетони на пористих заповнювачах, як і ніздрюваті, включають групу теплоізоляційних бетонів поряд з конструкційними і конструкційно-теплоізоляційними, найбільш вживаними в будівництві. У цю групу входять бетони, які мають низьку густину ($200...500 \text{ кг/м}^3$) і, як наслідок, відповідні теплофізичні показники, що дозволяють застосовувати їх і виробити на їх основі для теплоізоляції будівельних конструкцій та промислового обладнання.

З бетонів на пористих неорганічних заповнювачах як теплоізоляційні можуть бути використані керамзитобетон, керамзитоперлітобетон, керамзитозолобетон, шлакопемзобетон, шлакопемзоперлітобетон, шлакопемзозолобетон, перлітобетон та ін. Для таких бетонів відповідно до ДСТУ Б В.2.7-18-95 нормуються марки за середньою густиною і класи за міцністю на стиск (табл.7.7).

Таблиця 7.7

Нормовані показники теплоізоляційних бетонів на неорганічних пористих заповнювачах

Вид бетону	Марка за середньою густиною	Класи бетону за міцністю на стиск
Керамзитобетон, бетон на зольному гравію, шунгізитобетон	D400 D500	B0,35...B2 B1...B2
Перлітобетон	D300 D400 D500	B0,35...B0,75 B0,35...B2 B1...B2
Вермикулітобетон	D200 D300 D400 D500	B0,35...B2 B0,35...B2 B0,35...B2 B1...B2

Для отримання легких бетонів як крупний заповнювач застосовують пористий гравій та щебінь фракцій 5...10, 10...20 і 20...40 мм або суміші декількох фракцій, у яких повинно бути за об'ємом 25...50% дрібної фракції 5...10 мм. Для конструкційних бетонів фракція 20...40 мм не використовується, а в конструкційно-теплоізоляційних бетонах вона повинна складати не більше 30% за

об'ємом. У дрібнозернистих бетонах використовується фракція 5...10 мм.

Мінімальні марки за насипною густиною в кг/м³ для різних видів пористих гравію і щебеню, а також піску наведені нижче:

щебінь і пісок перлітовий -	75
щебінь і пісок вермикулітовий -	100
гравій і щебінь керамзитовий -	250
гравій шунгізитовий -	400
гравій аглопоритовий -	500
щебінь аглопоритовий -	400
щебінь шлакопемзовий -	400
пісок керамзитовий і шунгізитовий -	500
пісок аглопоритовий -	600
пісок шлакопемзовий -	700

Для кожного виду пористого заповнювача з насипною густиною корелюється його міцність (табл.7.8), що визначається випробуванням при стиску у циліндрі. Для перлітового щебеню певної марки за насипною густиною нормується також водопоглинання (табл.7.9).

Таблиця 7.8

Марки за міцністю пористих заповнювачів

Марка за насипною густиною	Марка за міцністю, не менше				
	керамзитового гравію і щебеню	шунгізитового гравію	аглопоритового		шлакопемзового щебеню
			гравію	щебеню	
250	П25	-	-	-	-
300	П35	-	-	-	-
350	П50	-	-	-	-
400	П50	-	П25	П25	П35
450	П75	-	П35	П35	П50
500	П100	П50	П50	П50	П50
600	П125	П75	П100	П75	П75
700	П150	П100	П150	П100	П100
800	П200	П150	П250	П150	-
900	-	П200	П300	-	-

7. Теплоізоляційні бетони

Гравій, щебінь і пісок, призначені для приготування теплоізоляційних легких бетонів, періодично випробовують на теплопровідність.

Таблиця 7.9

Марки перлітового щебеню

Найменування показника	Марка щебеню за насипною густиною							
	200	250	300	350	400	500	600	700
Марка за міцністю, не менше	П15	П25	П35	П35	П50	П75	П100	П150
Водопоглинання, % по масі, не менше	125	100	75	65	50	30	25	20

Усереднені значення коефіцієнтів теплопровідності легких, зокрема теплоізоляційних бетонів наведені в табл. 7.10.

У реальних умовах експлуатації значення коефіцієнта теплопровідності бетону у вологому стані можуть на 10...30% відрізнятись від розрахункових залежно від характеру та розміру пор, а також складів бетону та теплофізичних властивостей його компонентів.

Таблиця 7.10

Коефіцієнти теплопровідності легких бетонів

Марка бетону за середньою густиною	Значення коефіцієнту теплопровідності в сухом стані, Вт/(м·°С)		
	Керамзитобетон	Перлітобетон	Вермикулітобетон
D200	-	-	0,07
D300	-	0,09	0,08
D400	0,11	0,10	0,09
D500	0,14	0,11	0,11

У легких бетонах можливе створення щільної, поризованої або крупнопористої структури. У легких бетонах щільної структури цементний камінь може включати до 6% (за об'ємом) втягнутого повітря. При поризації 6...25%, яка досягається введенням мікропіно- і газоутворюючих добавок, структуру легкого бетону відносять до поризованої.

Бетони крупнопористої структури утворюються за рахунок відсутності у складі бетонної суміші дрібного заповнювача при вмісті цементного каменю, достатньому лише для склеювання крупного заповнювача без заповнення міжзернових порожнин. До

крупнопористого близькі за властивостями бетони нещільної структури, які одержують при неповному ущільненні бетонної суміші або при малій кількості дрібного заповнювача і обмеженому об'ємі цементного каменю.

Для теплоізоляційних бетонів більш притаманна поризована і крупнопориста структура.

Легкі бетони щільної структури характеризуються практично повним заповненням розчином пустот між зернами крупного заповнювача. Щільна структура забезпечується підбором відповідного зернового складу заповнювача, необхідним ущільненням бетонної суміші, оптимальним вмістом води та цементу. М.О.Поповим в тридцятих роках ХХ століття було встановлено, що найбільша середня густина і міцність бетону досягаються при деякій оптимальній витраті води (рис.7.5). Цій же витраті води відповідає і найменший коефіцієнт виходу бетонної суміші, що обчислюється за формулою:

$$\beta = \frac{V_{б.с}}{V_{ц} + V_{п} + V_{щ}}, \quad (7.17)$$

де $V_{б.с}$ – об'єм бетонної суміші в ущільненому стані; $V_{ц}$, $V_{п}$, $V_{щ}$ – відповідно об'єми цементу, піску і крупного заповнювача у насипному стані.

Коефіцієнт виходу бетону можна розглядати як його структурну характеристику, що виражає компактність розміщення складових бетону в одиниці його об'єму. Величина коефіцієнта виходу легких бетонів залежить від їх складу, об'єму пустот компонентів, ступеня ущільнення бетонної суміші та об'єму повітряних пор, які залишаються в ущільненому бетоні.

Для легких бетонів характерне більш високе зчеплення в'язучого з заповнювачем. У бетонах цього виду товщина контактної зони коливається від 30 до 60 мкм, в той час як у важких вона становить 25...50 мкм.

Цементний камінь і зерна пористого заповнювача мають різну міцність і деформативність. Напруження, що спричинені механічними впливами, а також усадочними та температурними деформаціями в легкому бетоні розподіляються більш рівномірно, ніж у важкому.

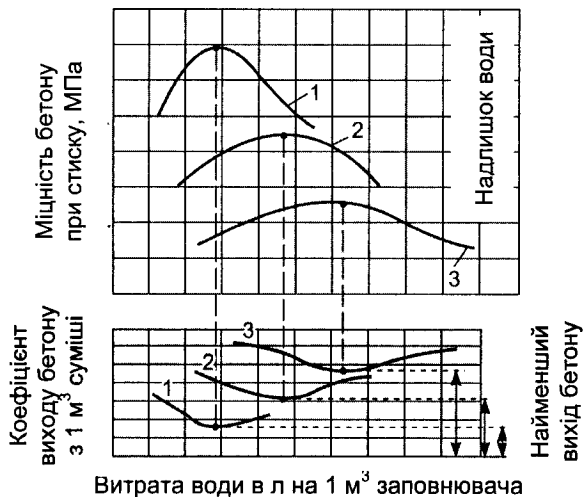


Рис. 7.5. Вплив витрати води на міцність і коефіцієнт виходу легкого бетону:
1 - ущільнення сильне; 2 - середнє; 3 - слабке

смоктування капілярами заповнювачів води, відтиснутої з цементного тіста, призводить до зменшення водовідділення бетонних сумішей.

Особливості структури легких пористих заповнювачів позначаються на реологічних властивостях легкобетонних сумішей. Розвинена поверхня пористих заповнювачів призводить до підвищення внутрішнього тертя і відповідно водопотреби бетонних сумішей.

В результаті інтенсивного капілярного поглинання води зернами наповнювачів легкобетонні суміші порівняно швидко втрачають рухомість. У той же час ця особливість може мати позитивне значення, оскільки підвищення початкової структурної міцності бетону дозволяє швидше здійснювати розпалубку виробів, зменшувати кількість форм.

Значна відмінність густини цементного тіста і зерен заповнювачів обумовлює підвищену ймовірність розшарування легкобетонних сумішей. Позитивно на однорідність бетонних сумішей впливають повітрятвувальні ПАР, важливою є також оптимізація параметрів віброущільнення.

У бетонах на пористих заповнювачах має місце вологообмін між заповнювачами і цементним тістом. Після замішування відбувається міграція води з цементного тіста у зерна сухого заповнювача, а через деякий час при твердінні бетону – із заповнювача в матричну фазу. Можливість від-

Середня густина легких бетонів у сухому стані залежить від густини зерен заповнювачів (рис.7.8), витрати цементу, об'ємної концентрації крупного заповнювача, об'ємів міжзернових пористот і втягнутого повітря. Вона може бути розрахована за формулою:

$$\rho_6 = \rho_3 \varphi + \left(1 - \varphi - \frac{V_n}{100} \right) \rho_p, \quad (7.18)$$

де ρ_3 і ρ_p - відповідно густина зерен пористого заповнювача і цементно-піщаного розчину; V_n - об'єм міжзернових порожнин; φ - об'ємна концентрація пористого заповнювача.

Міцність легких бетонів залежить не тільки від густини (рис.7.6) але й від міцнісних властивостей компонентів і їх відносного вмісту. Її можна орієнтовно розрахувати за формулою Ю.Є. Корніловича:

$$f_{cm} = R_p (1 - \varphi) + R_k \varphi, \quad (7.19)$$

де R_p - міцність розчинової складової; R_k - міцність крупного пористого заповнювача; φ - об'ємна концентрація крупного заповнювача.

Для бетонів з поризованою структурою (зокрема керамзитобетону) справедливим є емпіричне рівняння міцності на стиск:

$$f_{cm} = AR_k \left[B + \ell g \frac{R_p (1 - 0.02 V_{нов})^{4.5}}{R_k} \right], \quad (7.20)$$

де $V_{нов}$ - об'єм втягнутого повітря; A і B - емпіричні коефіцієнти, що дорівнюють при $R_p/R_k \geq 3,3$ відповідно 6,7 і 0,1, а при $R_p/R_k < 3,3$ - 3,7 і 0,6.

Теплопровідність легких бетонів залежить від теплофізичних властивостей пористого заповнювача, середньої густини і вологості бетону. Заповнювачі, що містять скловидну фазу, при однаковій середній густині дозволяють на 10...20% зменшити теплопровідність бетонів у порівнянні з заповнювачами, в структурі яких переважає кристалічна фаза (аглопорит, керамзит та ін.).

Орієнтовно теплопровідність легких бетонів можна розрахувати за формулою:

$$\lambda_{\sigma} = \lambda_p \frac{2\lambda_p + \lambda_3 - 2\varphi(\lambda_p - \lambda_3)}{2\lambda_p + \lambda_3 + \varphi(\lambda_p - \lambda_3)}, \quad (7.21)$$

де λ_p – теплопровідність розчинової складової; λ_3 – теплопровідність пористого заповнювача.

Для теплоізоляційних бетонів характерна підвищена сорбційна вологість. Вона залежить від початкового водовмісту свіжовідформованого бетону і при застосуванні пористих пісків більша в 1,5...2 рази, ніж у бетонів на щільних пісках. Для керамзитобетону при відносній вологості (за об'ємом) сорбційна вологість становить: при використанні керамзитового піску – 8...11%, перлітового піску – 10...14%, золи ТЕС – 9...12%.

Вибір способу підбору складу легких бетонів залежить від його необхідної структури.

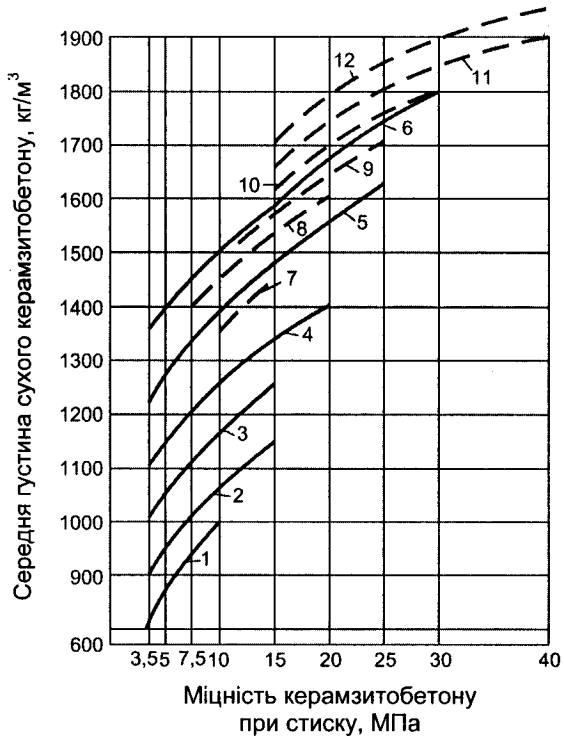


Рис. 7.6. Вплив насипної густини заповнювача на густину і міцність при стиску керамзитобетону на пористому і кварцовому піску:

на керамзитовому піску при насипній густині керамзитового гравію в кг/м^3 : 1 - 300; 2 - 400; 3 - 500; 4 - 600; 5 - 700; 6 - 800;

на кварцовому піску при насипній густині керамзитового гравію в кг/м^3 : 7 - 300; 8 - 400; 9 - 500; 10 - 600; 11 - 700; 12 - 800.

Підбір складів бетону щільної структури в основному здійснюють двома способами: за заданою рухомістю бетонної суміші і за оптимальною витратою води. При застосуванні першого способу спочатку призначається попередня витрата цементу з урахуванням необхідного класу бетону за міцністю і марки пористого заповнювача за міцністю. Наприклад, при проектному класі бетону за міцністю В2 попередню витрату портландцементу М400 при марці керамзитового гравію до D400 вибирають в межах 170...240 кг/м³. Витрату заповнювачів визначають за виразом:

$$З = \rho_6 - 1,15Ц, \quad (7.22)$$

де ρ_6 – густина бетону, кг/м³; Ц – витрата цементу, кг/м³.

Орієнтовну витрату піску в кг на 1 м³ бетону вираховують за формулою:

$$П = \frac{З \cdot r \cdot \rho_{н.п.}}{r \cdot \rho_{н.п.} + (1 - r) \rho_{н.щ.}}, \quad (7.23)$$

де r – частка піску в суміші заповнювачів за об'ємом; $\rho_{н.п.}$ і $\rho_{н.щ.}$ – відповідно насипні густини піску і крупного заповнювача.

Для теплоізоляційних бетонів долю піску при граничній крупності заповнювача 40 мм приймають зазвичай 0,25...0,35, 20 мм – 0,3...0,4.

Витрата крупного заповнювача:

$$Щ = З - П, \quad (7.24)$$

Після встановлення орієнтовних витрат цементу, піску і щебеню призначають витрату води з урахуванням виду крупного та дрібного заповнювачів і необхідного показника легкоукладальності легко бетонної суміші. Склад бетону уточнюють на пробних замісах.

У тих випадках, коли до легкобетонних сумішей не висуваються спеціальні вимоги з легкоукладальності, можна використовувати спосіб підбору складів бетону з оптимальною витратою води. Він проводиться за наступною схемою: вибирають заповнювачі, в'яжучі та добавки, що забезпечують отримання бетону із заданими властивостями; призначають зерновий склад заповнювачів; вибирають попередню витрату в'яжучого і добавок для виготовлення пробних замісів; визначають оптимальну витрату

води, що забезпечує найвищу міцність при прийнятих витратах в'язучого і параметрах ущільнення.

Для отримання поризованої структури після попереднього визначення витрат вихідних матеріалів знаходять необхідний об'єм втягнутого повітря. Орієнтовно його можна розрахувати у % за формулою:

$$V_{\text{пов}} = \frac{1}{10} \left[1000 - \left(\frac{Ц}{\rho_{\text{ц}}} + \frac{П}{\rho_{\text{п}}} + \frac{Щ}{\rho_{\text{щ}}} + В \right) \right], \quad (7.25)$$

де Ц, П, Щ і В – відповідно витрати цементу, піску, щебеню (гравію) і води на 1 м³ бетону, кг; $\rho_{\text{ц}}$ – густина цементу, кг/л; $\rho_{\text{п}}$ і $\rho_{\text{щ}}$ – густини пористого піску і щебеню (гравію) у цементному тісті.

На підставі довідкових даних (табл.7.11) встановлюється витрата повітрявтягувальної добавки, піно або газотворювача залежно від необхідного об'єму втягнутого повітря та обраного способу поризації, що уточнюється експериментально.

Таблиця 7.11

Орієнтовна витрата повітрявтягувальних добавок для приготування поризованих легких бетонів

Добавка	Необхідний об'єм втягнутого повітря, %	Витрата добавки, % від маси цементу при застосуванні піску		
		дробленого керамзитового	шлакового	шлакопемзового, аглопоритового
Смола нейтралізована повітрявтягувальна (СНП)	4...8	0,02...0,1	0,05...0,15	0,04...0,15
	8...12	0,05...0,15	-	0,1...0,2
Омилений дерев'яний пек	4...8	0,03...0,12	0,07...0,2	0,05...0,17
	8...12	0,07...0,17	-	0,12...0,25

Примітки: 1. Орієнтовна витрата водного розчину піноутворюючих добавок при об'ємі втягнутого повітря близько 10% становить (% від маси цементу): смолосапонинового (густиною 1,02) – 2...3, клеєканіфольного (густиною 1,015) – 1,5...2,5, омиленої каніфолі (густиною 1,018) – 2,5...3,5.
2. Витрата добавок збільшується зі зменшенням рухомості бетонної суміші.

З теплоізоляційних бетонів на основі неорганічних пористих заповнювачів найбільший інтерес для теплоізоляції представляють бетони та вироби на основі перліту і вермикуліту.

Перлітоцементні вироби призначені для теплової ізоляції будівельних конструкцій будівель і споруд різного призначення, а також промислового обладнання і трубопроводів при температурі ізолюючої поверхні до 600°C. Основні фізико-механічні показники виробів, що виготовляються зазвичай у вигляді плит, напівциліндрів і сегментів наведені в табл. 7.12.

Таблиця 7.12

Фізико-механічні показники перлітоцементних виробів

Найменування показника	Значення для марки			
	250	300	350	400
Густина, кг/м ³	до 250	250...300	300...350	350...400
Теплопровідність, Вт/(м ⁰ С). не більше при температурі: (25±5) ⁰ С (300±5) ⁰ С	0,065 0,110	0,070 0,120	0,081 0,128	0,090 0,140
Границя міцності при згині, МПа, не менше	0,23	0,25	0,28	0,32
Лінійна температурна усадка при 600 ⁰ С, % не більше	2	2	2	2
Вологість, % за масою, не більше	30	30	30	30

З бетонів на пористих органічних заповнювачах для теплової ізоляції ефективним є застосування *полістиролбетону*. Цей вид бетону виготовляється на основі спученого полістирольного заповнювача. Його отримують одно- або багатоступінчастим спінюванням суспензійного полістиролу. Можливе застосування також заповнювача, який одержують дробленням відходів пінополістирольних плит. Полістирольний заповнювач має марки за насипною густиною: 10, 15, 20, 25 і 30. Нормовані вимоги до полістиролбетону наведені в табл.7.13.

7. Теплоізоляційні бетони

Полістиролбетони мають порівняно низьку сорбційну вологість, достатню паропроникність.

Таблиця 7.13.

Вимоги до полістиролбетону

Марки за міцністю	Клас за міцністю на стиск (В)	Границя міцності на розтяг при згині, МПа	Марки за густиною	Марки за морозостійкістю	Коефіцієнт теплопровідності у сухому стані, Вт/(м·°С)
M2	-	0,08	150...200	-	0,055...0,065
M2,5	-	0,10	150...200	-	0,055...0,065
M3,5	-	0,15	200...250	-	0,065...0,075
M5	-	0,25	200...300	25...35	0,065...0,085
-	B0,5	0,35	250...350	35...50	0,075...0,095
-	B0,75	0,50	300...400	35...50	0,085...0,10
-	B1,0	0,60	350...450	35...50	0,095...0,115
-	B1,5	0,65	400...500	35...75	0,10...0,125
-	B2,0	0,70	500...600	50...100	0,125...0,145
-	B2,5	0,73	500...600	50...100	0,125...0,145

Полістиролбетонні вироби можуть виконувати одночасно функції стінових і теплоізоляційних матеріалів. Вони застосовуються у вигляді блоків, плит, перемичок і використовуються у зовнішніх огорожувальних конструкціях житлових і громадських будівель. Високі показники якості полістиролбетону забезпечуються при додатковій поризації за рахунок повітрявтягнення і введення добавок, що забезпечують необхідну легкоукладальність і ущільнюваність бетонних сумішей і дрібнопористу структуру розчинової частини.

В якості теплоізоляційного може застосовуватися також при густині 400...500 кг/м³ *арболіт* – бетон на основі заповнювачів з деревної і іншої рослинної сировини. Для нього встановлені (ДСТУ Б В.2.7-271:2011) класи за міцністю на стиск B0,35 ... B1,0. Залежно від виду заповнювача і середньої густини арболіту змінюється його теплопровідність (табл.7.14) і міцність (табл.7.15, рис.7.7).

Таблиця 7.14

Теплопровідність арболіту

Вид заповнювача	Коефіцієнт теплопровідності арболіту, Вт/(м·°С) при середній густині, кг/м ³						
	400	450	500	550	600	650	700
Подрібнена деревина	0,08	0,09	0,095	0,105	0,12	0,13	0,14
Подрібнені стебла бавовни та рисової соломи, костриця льону і коноплі	0,07	0,075	0,08	0,095	0,105	0,11	0,12

Таблиця 7.15

Середня густина і міцність теплоізоляційного арболіту

Вид арболіту	Клас за міцністю при стиску	Марка за міцністю при осьовому стиску	Середня густина, кг/м ³ , арболіта на			
			подрібненій деревині	подрібнених стеблах бавовни або костриці льону	костриці коноплі	подрібненій рисовій соломі
Теплоізоляційний	В0,35	М5	400-500	400-450	400-450	500
	В0,75	М10	450-500	450-500	450-500	-
	В1,0	М15	500	500	500	-
Конструкційний	В1,5	-	500-650	550-650	550-650	600-700
	В2,0	М25	500-700	600-700	600-700	-
	В2,5	М35	600-750	700-800	-	-
	В3,5	М50	700-850	-	-	-

Арболіт застосовується у промисловому, цивільному та сільськогосподарському будівництві у вигляді панелей та блоків для зведення стін і перегородок, плит перекриттів і покриттів будівель, теплоізоляційних і звукоізоляційних плит. Арболітові конструкції експлуатують при відносній вологості повітря

приміщень не більше 60%, при більшій вологості необхідне улаштування пароізоляційного шару.

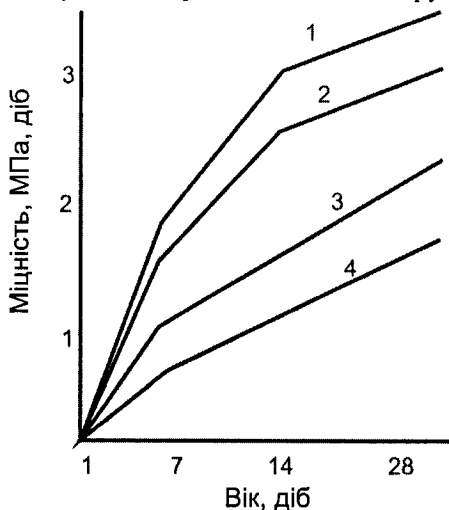


Рис. 7.7. Залежність міцності арболіту від породи дерева для заповнювача з: 1 - ялини; 2 - сосни; 3 - берези; 4 - осики.

активністю заповнювача і його схильністю до значних вологісних об'ємних деформацій.

Границя міцності арболіту залежить від його вологості, особливо в діапазоні від 0 до 25%. Максимальну міцність цей матеріал набуває при вологості 16...17%. Деформація при короткочасному навантаженні у арболіту приблизно в 8...10 разів більша, ніж у легких бетонів на мінеральних пористих заповнювачах.

Арболіт має досить високе водопоглинання. Однак, перевагою цього матеріалу є легка віддача поглинутої води, тобто швидке висихання. Морозостійкість арболітових виробів призначається залежно від режиму їх експлуатації та кліматичних умов району будівництва; у всіх випадках вона приймається не менше F25.

Для виготовлення заповнювачів з дерева вихідний продукт для зниження кількості шкідливих екстрактивних речовин певний час витримують на складах (хвойні породи не менше 2 міс,

Не допускається впливу на арболіт агресивних середовищ і систематичної дії температур вище 50° С і нижче -40° С.

Зовнішня поверхня конструкцій з арболіту, що контактує з атмосферною вологою, незалежно від вологісного режиму експлуатації повинна мати оздоблювальний (фактурний) шар.

Порівняно невисокі міцнісні характеристики арболіту пояснюються хімічною ак-

листяні – 6 міс). При позитивній температурі витримка скорочується до 1 міс за умови подальшого подрібнення деревини в тріску. Тріску хвойних і особливо листяних порід обов'язково замочують у воді або в розчинах мінеральних солей. Останні, нейтралізуючи дію шкідливих речовин у деревині, одночасно прискорюють твердіння цементу.

Для теплоізоляційного арболіту класів В0,35...В1 витрата цементу М400 становить 260...360 кг/м².

Мінімальна витрата цементу досягається при використанні тріски з відходів лісопиляння і деревообробки хвойних порід, а максимальна – з відходів лісозаготівель змішаних порід і костриці (табл. 7.16.). Витрата хлориду кальцію і рідкого скла не перевищує 8...9кг/м³, сульфату алюмінію – 15...20кг/м³.

Таблиця 7.16

Витрата портландцементу марки 400 на 1 м³ арболіту

Заповнювач	Максимальна витрата в'язучого, кг/м ³ залежно від класу арболіту		
	В0,35	В0,75	В1
Подрібнена деревина з відходів: лісопиляння і деревообробки хвойних порід	260	280	300
лісозаготівель хвойних порід	280	300	320
лісопиляння і деревообробки змішаних порід	290	310	330
лісозаготівель змішаних порід	310	330	350
Подрібнена рисова солома	300	–	370
Костриця конопель або льону	220	310	360
Подрібнені стебла бавовнику	260	290	320

Технологія виготовлення арболітових виробів (рис.7.10) включає підготовку сировинних матеріалів, приготування арболітової суміші та укладання її у форми, твердіння і сушіння, обробку і складування.

На відміну від виробництва штучних мінеральних пористих заповнювачів зі значними витратами енергії отримання заповнювача для арболіту зводиться до подрібнення деревини до отримання оптимального фракційного складу. У ряді випадків може бути використаний заповнювач у вигляді верстатної стружки і пилорамної тирси, який вимагає тільки розсівання на фракції. Однак, отримання якісного арболіту на цих заповнювачах

7. Теплоізоляційні бетони

утруднене у зв'язку з тим, що вони мають підвищену питому поверхню. Це призводить до збільшення виділення екстрактивних речовин у цементний розчин в процесі приготування суміші і нормованої кількості цементу виявляється недостатньо для створення структури з високою міцністю. Кращі результати дає спеціально приготована за типовою схемою подрібнена деревина з кускових відходів.

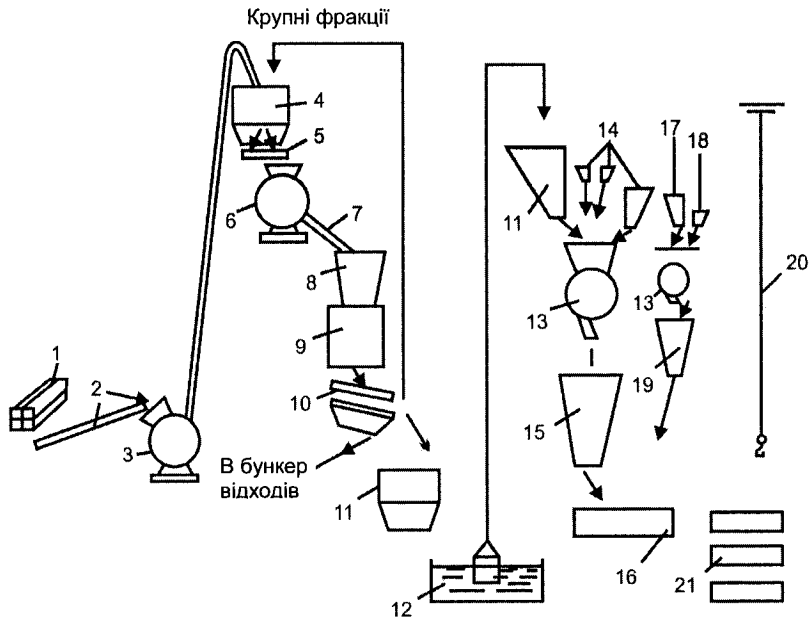


Рис. 7.10. Схема виробництва виробів з арболіту на деревних відходах:

- 1 - приймальна площадка; 2 - конвеєр; 3 - рубальна машина;
- 4 - циклон; 5 - стрічковий конвеєр; 6 - молоткова дробарка;
- 7 - пневмоконвеєр; 8 - циклон; 9 - проміжний бункер; 10 - віброгрохот; 11 - бункер; 12 - ванна; 13 - розчинозмішувач;
- 14 - дозатори; 15 - арболітоукладач; 16 - формувальні пости;
- 17 - бункер для заповнювача; 18 - дозатор для води;
- 19 - розчиноукладач; 20 - кран; 21 - пост витримки

Деревина – анізотропний матеріал, тому подрібнена деревина повинна мати голчасту форму з коефіцієнтом форми

(відношення найбільшого розміру до найменшого), рівним 5...10, і товщину 3...5 мм. Максимальні розміри повинні бути не більше 25мм по довжині. Частинки такої форми володіють найбільш близькими за абсолютними значеннями вологісними деформаціями вздовж і поперек волокон.

В арболітову суміш замість подрібненої деревни можна вводити до 30% верстатної стружки і тирси після проходження їх через молотковий млин для гомогенізації та відділення на віброгрохоті пилоподібних фракцій.

Основною технологічною операцією при виготовленні арболітових виробів є ущільнення суміші до необхідної середньої густини. Арболітові суміші через притаманні їм пружні властивості не відповідають загальним закономірностям, властивим бетонним сумішам на інших заповнювачах. При ущільненні суміші звичайна вібрація малоефективна, а пресування призводить до того, що після зняття навантаження відбувається розпресування і порушення ущільненої структури. Ці особливості арболітової суміші пояснюються властивостями деревного заповнювача – легкого, пружного, пористого матеріалу, швидко поглинаючого вологу в процесі приготування суміші, внаслідок чого суміш малорухома навіть при великих витратах води. Тому на практиці доводиться застосовувати високі значення В/Ц, рівні 1,1...1,3, а в разі отримання теплоізоляційного арболіту на базі костриці – ще вищі.

До механізованих способів ущільнення арболіту відносяться вібросилобий прокат, віброштампування, вібрування з привантаженням.

Завершальним етапом технологічного процесу є теплова обробка виробів до набору відпускнуї міцності. Пропарювання арболіту за звичайними для бетонів режимами призводить до втрати міцності, що пояснюється виникненням внутрішніх напружень за рахунок об'ємних деформацій заповнювача, які руйнують структуру твердіючого цементного каменю; одночасно посилюється виділення екстрактивних речовин у розчин, що сприяє "отруєнню" цементу. Кращі результати досягаються при низькотемпературній обробці за м'якими режимами, аналогічними для деревини при її сушінні – температурі 50...60° С і відносній вологості повітря 70...80%. При такому режимі арболіт набуває розпалубочної міцності через 18...20 год. Вона не перевищує

7. Теплоізоляційні бетони

25...40% марочної, а вологість залишається у межах 30...35%. Для подальшого набору міцності і зниження вологості до відпускних величин вироби додатково витримують на закритому складі протягом 7 днів за температури 16...18° С.

Найважливішим фактором, що визначає високу техніко-економічну ефективність застосування арболіту, є значне зменшення капітальних вкладень для створення сировинної бази виробництва арболітових конструкцій у порівнянні з відповідними витратами для виробництва легких бетонів на мінеральному пористому заповнювачі.

Виробничий досвід показує, що при будівництві малоповерхових будівель конструкції та вироби з арболіту ефективно замінюють керамзитобетон, ніздрюваті бетони, а за рядом експлуатаційних властивостей перевершують їх.

8. ЖАРОСТІЙКІ БЕТОНИ

8.1. Класифікація та загальні вимоги

До жаростійких належать бетони, що мають здатність при тривалому впливі високих температур (до 1800⁰С) зберігати в необхідних межах фізико-механічні властивості.

За призначенням жаростійкі бетони розділяють на конструкційні та теплоізоляційні, за структурою – на щільні, важкі, легкі та ніздрюваті.

Жаростійкі бетони також поділяють:

за видом в'язучого – на портландцементі та його різновидах; алюмінатних цементах(глиноземистому та високоглиноземистому); силікатних(рідкому склі), фосфатних та магнезіальних в'язучих;

за видом тонкозмеленої добавки – з шамотною, кордієритовою, золошлаковою, керамзитовою, аглопоритовою, периклазовою та ін.;

за видом заповнювача – з шамотним, корундовим, магнезіальним, карборундовим, кордієритовим, андезитовим, перлитовим та ін.

Технічні вимоги до основних видів жаростійких бетонів, що застосовуються у будівництві та виготовляються на основі портландцементу, алюмінатних цементах та силікатному (рідкому склі) в'язучому наведені в ГОСТ 20910-90.

Найменування бетонів відповідно до ГОСТ 20910-90 повинні включати основні ознаки: вид бетону (BR – бетон жаростійкий); вид в'язучого (P – портландцемент, А – алюмінатний цемент, S – силікатне в'язуче), клас бетону за міцністю на стиск (B1...B40), за гранично допустимою температурою застосування (IЗ... I18). Наприклад: бетон жаростійкий на портландцементі класу B20 за міцності на стиск з температурою застосування 1200⁰С – BR P B20 I12.

Жаростійкий бетон із середньою густиною більше 1400 кг/м³ призначений для несучих конструкцій, до 1100 кг/м³ включно – для ненесучих огорожуючи конструкцій та як теплоізоляційний матеріал.

Для жаростійких бетонів встановлено 14 класів за гранично допустимою температурою застосування. Для бетонів класів ИЗ...И180 вона становить відповідно 3000...1800°С.

Поряд з гранично допустимою температурою для кожного класу бетону нормують значення залишкової міцності та температуру деформації під навантаженням (табл. 8.1...8.3). Залишкова міцність бетону залежить від виду в'язучого та температури нагріву. Вона характеризується процентним відношенням міцності бетону після нагрівання до гранично допустимої температури застосування для бетонів класів ИЗ ... И7 та після нагрівання до температури 800° С для бетонів класів И8...И18 до міцності бетону у проектному віці.

Таблиця 8.1

Нормовані властивості жаростійких бетонів
на портландцементі

Клас бетону	Залишкова міцність, %, не менше	Температура, що відповідає деформації під навантаженням, °С, не менше	
		4 %	40 % або руйнуванню
ИЗ	80	-	-
И6	50	-	-
И7	40	-	-
И8	30	-	-
И9	30	900	950
И10	30	1000	1050
И11	30	1080	1150
И12	30	1180	1250

Для жаростійких бетонів можуть встановлюватись класи за міцністю на стиск : В1; В1,5; В2; В2,5; В3,5; В5; В7,5; В10; В12,5; В15; В20; В25; В30; В35; В40. Для залізобетонних конструкцій, що працюють в умовах впливу високих температур, клас бетону за міцністю на стиск приймають не нижче В 12,5, попередньо напружених конструкцій – не нижче В30.

Поряд з міцністю бетону в проектному віці при виготовленні жаростійких бетонів, визначається контрольна міцність після витримування зразків у певних умовах. Для бетонів на портландцементі, шлакопортландцементі та високоглиноземистих цементах витримування зразків проводиться в нормальних умовах протягом 7 діб (можливе пропарювання),

потім здійснюється їх висушування до постійної маси. Зразки бетонів на глиноземному цементі витримують 3 доби в нормальних умовах. При застосуванні рідкого скла як в'язучого, зразки витримують при температурі 20° С і відносній вологості не більше 60% протягом 3 діб, потім їх висушують до постійної маси. Режим тверднення зразків при використанні для виготовлення бетонів ортофосфорної кислоти залежить від виду заповнювачів.

Таблиця 8.2

Нормовані властивості жаростійких бетонів на глиноземистому цементі

Клас бетону	Залишкова міцність, %, не менше	Температура, що відповідає деформаціям під навантаженням, °С, не менше	
		4 %	40% або руйнуванню
И8	30	-	-
И10	30	1000	1050
И11	30	1080	1150
И12	30	1180	1250
И13	30	1270	1340
И14	30	1360	1420
И15	30	1450	-
И17	30	1600	-
И18	30	1650	-

При необхідності для жаростійких бетонів нормуються також марки бетону за *термостійкістю* – за числом водних (T_1) або повітряних (T_2) теплосмін: T_{15} ; T_{10} ; T_{15} ; T_{20} ; T_{30} ; T_{40} ; T_{20} ; T_{25} ; T_{20} ; T_{25} .

Бетонні та залізобетонні конструкції із жаростійких бетонів, що працюють при незмінному впливі високих температур повинні мати марку за термічною стійкістю не нижче T_{15} , циклічному – T_{15} , циклічному з різким охолодженням повітрям або водою – T_{25} . При повітряних теплосмінах марки бетонів при постійному нагріванні повинні бути не нижче T_{20} , циклічному – T_{20} .

Нормовані властивості жаростійких бетонів на рідкому склі

Клас бетону	Залишкова міцність, %, не менше	Температура, що відповідає деформаціям під навантаженням, °С, не менше	
		4 %	40% або руйнуванню
И6	80	-	-
И8	70	-	-
И10	70	1000	1050
И11	70	1080	1150
И12	70	1180	1250
И13	50	1270	1340

Для бетонів із середньою густиною не нижче 1500 кг/м^3 за відповідних умов експлуатації конструкцій та виробів можуть також нормуватися марки за водонепроникністю та морозостійкістю

Для фундаментів та інших споруд, що знаходяться під землею нижче рівня ґрунтових вод, марка за водонепроникністю бетону повинна бути не нижче W6, для теплових агрегатів – W10. При циклічній дії температури нижче 0°C в період будівництва теплових агрегатів або при їх зупинці жаростійкий бетон з середньою густиною 1500 кг/м^3 і більше повинен мати марки за морозостійкістю F15, F25, F35, F50, F75.

Після нагріву до визначено допустимої температури для бетонів класів И13...И18 значення усадки не повинні перевищувати:

- 1% при густині бетону 1500 кг/м^3 і більше;
- 1,5% – при густині менше 1500 кг/м^3 ;
- 2% – для ніздрюватих бетонів.

Вибір в'язучого для жаростійких бетонів проводиться з урахуванням досягнення, крім необхідних фізико-механічних властивостей, і корозійної стійкості при дії високих температур і агресивного середовища. При дії нейтрального і лужного газових середовищ рекомендується застосування жаростійкого бетону на портландцементі та шлакопортландцементі, кислого газового середовища і розплавів лужних металів - бетону на рідкому склі.

Для бетонів на портландцементі та рідкому склі застосовують тонкомелені добавки, стійкі до дії високих температур на основі шамоту, кордієриту, золошлакових сумішей ТЕС, керамзиту, аглопориту та ін. Для отримання тонкомеленої добавки використовують також подрібнені жаростійкі бетони. Тонкість помелу добавок повинна бути такою, щоб при просіюванні через сито №008 проходило не менше 50% взятої проби. У добавках вміст вільних СаО та MgO не повинен перевищувати 3%, а карбонатів – 2%.

Заповнювачі жаростійких бетонів вибирають залежно від граничної температури, міцності та інших нормованих властивостей застосування бетонів.

При температурі експлуатації до 600...800° С як заповнювачі знаходять застосування гірські породи, що не містять значної кількості вільного кварцу (андезити, базальти, діабазити, туфи, пемза), а також доменні шлаки, керамзит, аглопорит та ін. Для бетонів, які експлуатуються за температури 1200...1700° С, як заповнювачі застосовують різні вогнетривкі матеріали -шамот, хроміт, кордієрит, корунд та ін.

Крім жаростійких бетонів на портландцементі, шлакопортландцементі, алюмінатних цементях, рідкому склі, які найширше використовуються у будівництві, відомий і ряд інших складів. Жаростійкі бетони можна отримувати на основі періклазового цементу, що заміщується водними розчинами хлориду або сульфату натрію, шлаколуужних в'язучих та ін.

8.2 Жаростійкий бетон на портландцементі та шлакопортландцементі

Звичайний важкий бетон на портландцементі може експлуатуватись у конструкціях при дії температур до 200⁰ С. При цьому клас бетону за міцністю необхідно вибирати з урахуванням того, що при тривалій дії підвищених температур (до 200⁰ С) міцність бетону на стиск знижується до 25%, на розтяг та згин – до 50%.

Інтенсивні деструктивні процеси при нагріванні бетону відбуваються за температури вище 200° С (рис.8.1).

f_{ct} , %

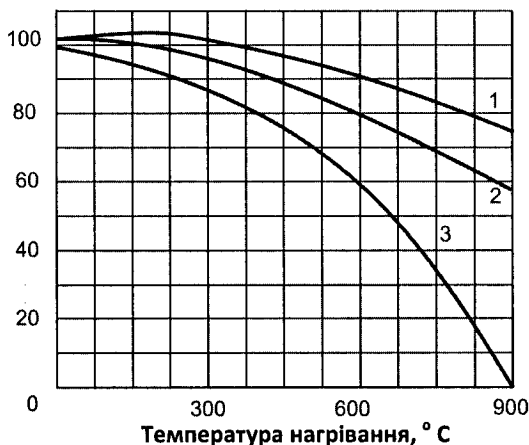


Рис.8.1. Вплив температури на міцність бетону:

- 1 – портландцемент 70% + трепел 30%;
- 2 – портландцемент 70% + пемза 30%;
- 3 – портландцемент

зерен цементу. При 500...600°С йде розпад гідратних новоутворень і дегідратація $\text{Ca}(\text{OH})_2$ – продукту гідролізу клінкерних мінералів, переважно трикальцієвого силікату, що сприяє подальшому зниженню міцності цементного каменю.

В інтервалі 600...700°С можливе модифікаційне перетворення $\beta - 2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ у $\gamma - 2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, що супроводжується деяким збільшенням об'єму. Портландцементні зразки, прогріті до температури 600...800°С, повністю руйнуються після витримання їх у повітряно-сухих умовах, в основному, у результаті вторинної гідратації оксиду кальцію.

При безперервному нагріванні до 1200°С міцність цементного каменю становить 35...40% міцності контрольних зразків. При цьому розвивається значна усадка – до 1% і більше.

Нагрівання в межах 200...400°С призводить до поступового зниження міцності цементного каменю і бетону через дегідратацію в основному гідроалюмінатів, а також розпад і перекристалізацію гідросульфалюмінатів кальцію. При нагріванні понад 300°С порушується структура цементного каменю і бетону в результаті різних деформацій гідратних продуктів цементного каменю і непрогідратованих

Встановлення основної причини руйнування цементного каменю – гідратації утвореного при нагріванні оксиду кальцію – дозволило розробити основний спосіб надання йому жаротривких властивостей. Цей спосіб полягає у введенні в цемент або бетонні суміші тонкомелених мінеральних добавок, які хімічно зв'язують СаО, не утворюють з мінералами цементу легкоплавких речовин, є стійкими до впливу високих температур і зменшують усадку цементного каменю при нагріванні.

Як тонкомелені добавки застосовується цілий ряд дисперсних матеріалів, які є хімічно активними по відношенню до СаО - на основі золи-виносу, доменного гранульованого шлаку, шамоту та ін. Тонкомелені добавки вводять у бетонні суміші зазвичай, коли максимальна температура служби бетону перевищує 350° С, кількість їх призначається, як правило, не менше 30% маси змішаного в'язучого, що складає 100...150 кг/м³ і збільшується при застосуванні чистоклінкерного портландцементу і підвищенні температури експлуатації бетону. Реакційна здатність добавок до СаО при підвищених температурах зростає, коли кремнезем або інші оксиди (глинозем, оксид хрому) в добавках знаходяться в аморфному або склоподібному стані. Так, реакція взаємодії між СаО і аморфним кремнеземом йде вже при 500...600° С, а для кристалічного кварцу вона тільки починається при 600° С. Використання добавок, що містять кварц, небажане і через здатність його до поліморфних перетворень, що викликають порушення структури бетону. Небажане також використання таких добавок як глина, діатоміт та інші, які призводять до значного збільшення усадки. Для підвищення вогнетривких властивостей бетонів застосовують відповідні добавки з вогнетривких матеріалів – хроміту, магнезиту, хромомagneзиту. Ступінь подрібнення добавок повинен бути приблизно таким як і цементу, від нього значною мірою залежить їх реакційна здатність.

На рис.8.2 наведені за даними К.Д.Некрасова криві зміни міцності на стиск цементного каменю залежно від виду тонкомеленої добавки. Введення тонкомеленої добавки зменшує, як правило, зниження міцності особливо після впливу температури 600° С і вище. Кращі результати отримані при введенні тонкомеленого шамоту. Введення у цемент тонкомелених добавок, які не містять компонентів, здатних зв'язувати оксид кальцію та

покращувати жаростійкі властивості цементного каменю, призводить до різкого падіння міцності

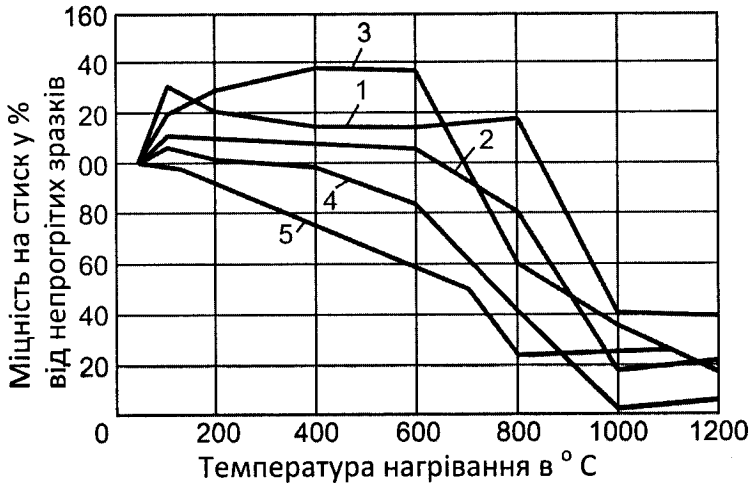


Рис.8.2. Зміна міцності на стиск цементного каменю при нагріванні залежності від виду тонкомеленої добавки (співвідношення портландцемент: тонкомелена добавка - 1:1 за масою для всіх складів, а для складу з хромітом 1:0,5)

1 – портландцемент з шамотом; 2 – з меленим кварцом; 3 – з меленим гранульованим шлаком; 4 – без добавок; 5 – з хромітом

Гранична робоча температура жаростійких бетонів визначається *температурою деформації* (розм'якшення) під навантаженням 0,2 МПа. Температура початку розм'якшення портландцементу без тонкомелених добавок знаходиться в межах 970...1130° С, а температура 40%-ої деформації – від 1370 до 1480°С. Тонкомелені добавки підвищують температуру початку розм'якшення, якщо утворюють при нагріванні з цементом сполуки, які мають високу вогнетривкість і незначну розчинність у розплаві. До таких добавок належать хроміт та магнезит. Цементний камінь без тонкомеленої добавки руйнується під дією навантаження 0,2 МПа при температурі 1460°, тоді як зразки з трьома масовими частками магнезиту – понад 1700°С.

Портландцемент за жаростійкістю значно поступається шлакопортландцементу, що утворює при гідrataції набагато меншу кількість $\text{Ca}(\text{OH})_2$. При достатній величині залишкової міцності на стиск бетону після нагрівання до 800°C і використанні шлакопортландцементу відпадає необхідність введення тонкомелених добавок.

На портландцементі, швидкотверднучому цементі та шлакопортландцементі виготовляють бетони класів від ІЗ до ІІ2 залежно від виду заповнювачів і тонкомелених добавок.

При нагріванні звичайних цементних бетонів деструктивні процеси відбуваються не тільки в цементному камені, але і в заповнювачах. Такі процеси зумовлені нерівномірним температурним розширенням полімінеральних кристалічних порід, якими є, наприклад, граніти. Непридатні в якості заповнювачів бетонів, що працюють в умовах нагрівання, матеріали, що містять вільний кварц (піщаник, кварцові піски, кварцити та ін.). Найнебезпечнішим є перетворення β -кварцу в α -кварц при 573°C , яке пов'язане зі зменшенням густини зерен і, відповідно, ефектом об'ємного розширення.

Звичайні заповнювачі використовують при температурі до 200°C . Вапняки та доломіти, що широко застосовуються як заповнювачі для важкого бетону, починають розкладатися приблизно при 600°C . Вибір заповнювачів для жаростійких бетонів залежить від максимальної температури їх експлуатації. Заповнювачі з таких вилитих вивержених порід, як андезити, діабазити, базальти, вулканічні лави, туфи, попели, пемза, що не містять вільного кварцу, при введенні в бетонні суміші тонкомелених добавок можуть використовуватися в умовах температури до $700\dots 800^\circ \text{C}$. У такому ж діапазоні температури використовуються доменні відвальні шлаки, що не розпадаються, з модулем основності не більше 1, а також паливні шлаки і бій звичайної глиняної цегли.

Для легких жаростійких бетонів як заповнювачі використовують керамзит, перліт, вермикуліт.

Найбільшого поширення як заповнювач жаростійких бетонів отримав *шамот*. До шамотних належать матеріали з вмістом $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$ від 30 до 45%. Їх отримують випалюванням

вогнетривких глин та каолінів до спікання. Випалений продукт сортують, подрібнюють та розсіюють за фракціями.

Для жаростійких бетонів з найбільш високою температурою застосування в якості заповнювачів використовують біл магнетитових, хромомагнетитових, корундових та інших вогнетривів.

Важкі жаростійкі бетони на портландцементі виготовляють зазвичай класів В15...В40. Легкі жаростійкі бетони мають міцність, що відповідає класам В2,5...В15 та густину 500...1200 кг/м³. Мінімально допустима залишкова міцність бетонів після нагрівання до 800° С становить 30...50% початкової міцності.

Важливим показником тріщиностійкості жаростійких бетонів є *усадка*. Вона зумовлена в основному усадкою цементного каменю, яка зростає не тільки зі збільшенням водоцементного відношення, а й з підвищенням температури нагріву. Усадка бетонів при сушінні становить 0,04...0,07%. При 800...1100° С лінійна усадка жаростійкого бетону зростає до 0,2...0,7%. Величина усадки збільшується з підвищенням витрат цементу та тонкомеленої добавки.

Якість жаростійких бетонів значною мірою залежить від режиму сушіння та першого нагріву.

При роботі теплових агрегатів жаростійкі бетони піддаються різким коливанням температури, що є однією з основних причин появи тріщин і відколів на футеровці. *Термічна стійкість* бетонів залежить від виду в'язучих, заповнювачів і тонкомелених добавок, водов'язучого відношення. Для портландцементних бетонів з шамотним заповнювачем при нагріванні до 800° С вже через 10...15 циклів з'являється волосяні, а 20...25 циклів відкриті тріщини. Для підвищення термостійкості бетонів застосовують дисперсне армування температуростійкими волокнами з азбесту, базальту та ін. Для підвищення термічної тріщиностійкості необхідно підбирати склад бетону з мінімальним розходженням температурних деформацій крупного заповнювача та розчинової частини. Нагрівання жаростійкого бетону на портландцементі бажане не раніше ніж через 7 діб нормального тверднення.

Вимоги до термостійкості бетону та залізобетонних конструкцій залежать від їх призначення, конкретних умов

експлуатації. Так, теплові агрегати повинні зберігати проектну міцність протягом усього нормативного терміну експлуатації, покриття підлоги гарячих цехів повинне витримувати поперемінне нагрівання і охолодження при дії ударних навантажень.

Термічна стійкість бетону, яка характеризується кількістю циклів нагрівання та охолодження до певного зниження міцності, лінійно пов'язана з його *коефіцієнтом термічного розширення* (к.т.р.) (рис.8.3). Для цементного каменю величина к.т.р. знаходиться в межах від 10×10^{-6} до $18,3 \times 10^{-6}$ на 1°C . Зі збільшенням вмісту заповнювача цей показник зменшується. Нижче наведена за даними А.М.Невілля зміна величини к.т.р. для цементно-піщаного розчину:

цемент:пісок	к.т.р. $\times 10^{-6}$ на 1°C
1:0	17,2
1:1	12,5
1:3	10,3
1:6	9,3

Коефіцієнт термічного розширення жаростійкого бетону, в основному, залежить від розширення заповнювача і коливається в інтервалі $4...11 \cdot 10^{-6}$. Одним з найважливіших факторів, що впливають на термічне розширення і термостійкість бетону, є його вологість. Рівноважна вологість важкого бетону залежить від його проникності, ступеня гідратації і виду в'язучого, відносної вологості і температури навколишнього середовища. Наприклад, для важкого бетону на портландцементі з В/Ц=0,5 при $t=20^\circ\text{C}$ рівноважна вологість коливається від 0,5 до 6,8% при зміні відносної вологості від 0,15 до 0,95.

При інтенсивному тепловому впливі руйнуванню більшою мірою піддаються поверхневі шари бетону у виробках і конструкціях з найбільшим градієнтом вологості. Тиск пари у бетоні значною мірою залежить від швидкості нагрівання, проникності і початкової вологості. Найбільший тиск пари від теплового впливу спостерігається при заповненні водою 70...80% порового простору.

Термостійкість бетону збільшується зі зменшенням розміру крупного заповнювача, при ретельному приготуванні бетонної суміші та догляді за бетоном при його твердінні з метою отримання

структури з найменшою кількістю та мінімальними за довжиною тріщинами.

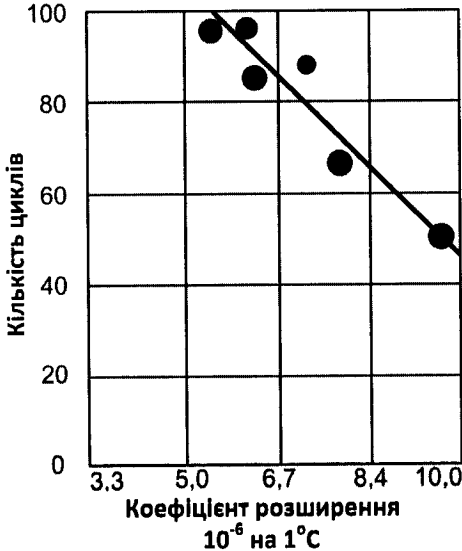


Рис. 8.3. Залежність між коефіцієнтом лінійного термічного розширення бетону та кількістю циклів нагрівання та охолодження, необхідною для зниження величини границі міцності при згині на 75%

забезпечують мінімальну різницю температурних деформацій окремих компонентів.

Специфічним видом руйнування бетону при тепловій дії є руйнування під впливом вогню в умовах пожежі. Під впливом високотемпературного полум'я знижується несуча здатність бетонних і залізобетонних конструкцій, а через певний час під дією вогню можливе їх руйнування. Зниження міцності бетону в умовах пожежі відбувається, в основному, в результаті розвитку внутрішніх напружень внаслідок відмінності температурного

Величина коефіцієнта розширення і термостійкість зменшуються з віком бетону. Більшу термостійкість буде мати бетон з меншими значеннями модуля пружності, більшою теплопровідністю. Важливе значення має також відмінність температурних деформацій крупного заповнювача та розчинової частини. Термостійкість бетону можна збільшити дисперсним армуванням температуростійкими волокнами з азбесту, базальту або сталевих фібр, конструктивним армуванням, застосуванням заповнювачів із андезиту, базальту, діабазу та інших матеріалів, що

коефіцієнта лінійного розширення цементного каменю і заповнювачів.

Вогнестійкість бетону як і вогнестійкість інших будівельних матеріалів характеризується *границею вогнестійкості*. Границею вогнестійкості будівельних конструкцій називається час, протягом якого вони зберігають несучі та огороджувальні функції в умовах пожежі. Втрата конструкцією несучої здатності супроводжується її раптовим або дуже швидким обваленням. Огороджувальна здатність конструкцій втрачається, коли температура поверхні, що не обігривається, в середньому зростає на 160°C і в суміжних приміщеннях можливе самозаймання матеріалів. При цьому в конструкціях утворюються наскрізні тріщини, через які проникають продукти горіння та полум'я.

Границя вогнестійкості визначається випробуванням зразків у спеціальній камері, де тепловий режим підтримують у відповідності зі стандартною кривою температура-час.

Границя вогнестійкості бетонних та залізобетонних конструкцій становить 2...5 год. Наприклад, залізобетонні колони в будівлях 1-го ступеня вогнестійкості при пожежі не повинні руйнуватися раніше 2,5 годин. Границю вогнестійкості підвищують, збільшуючи товщину бетонного шару та підбираючи відповідний склад бетону.

Жаростійкі бетони на портландцементі та шлакопортландцементі застосовують для зведення теплових агрегатів, конструкцій газоходів, димових труб, елементів захисних стін та перекриттів АЕС та для багатьох інших конструкцій та споруд. Властивості цього виду бетонів залежно від виду тонкомелених добавок та заповнювачів наведені у табл.8.4.

Для отримання жаростійких бетонів застосовують портландцемент, портландцемент з мінеральними добавками, швидкотверднучий портландцемент та шлакопортландцемент марки не нижче 400.

Орієнтовні склади жаростійких бетонів на портландцементі та шлакопортландцементі за даними К.Д. Некрасова та А.Л. Тарасової наведені у табл.8.5. Осадка конуса бетонних сумішей зазвичай приймається не більше 2 см.

Таблиця 8.4

Основні властивості жаростійких бетонів на портландцементі

Вид вихідних матеріалів		Клас бетону за граничною температурою застосування	Максимальна проектна марка за міцністю	Залишкова міцність на стиск до 800°C, %, не менше	Температурна усадка після нагрівання до граничної температури, %, не більше	Термічна стійкість, кількість тепломіні 800-20°C (вола)
Тонкомелені добавки	Заповнювачі					
Шамотні	Шамотні	12	M450	30	0,6	12
З бетонного лому жаростійких бетонів із заповнювачами з шамоту та феромолібденового шлаку		11	M400	30	0,5	11
Шамотні, кордієритові	Кордієритові	11	M450	30	0,6	10
Шамотні, бетонні, з феромолібденового шлаку	З шлаків виробництва вуглецевого ферохрому	11	M400	50	0,4	19
З золи-виносу, аглопориту, керамзиту, бою глиняної цегли, шамоту	Случений вермикуліт	10	M15	40	0,6	—
З золи-виносу, аглопориту, керамзиту, бою глиняної цегли, шамоту	З суміші керамзиту та слученого вермикуліту	10	M35	40	0,6	—
З золи-виносу, аглопориту, керамзиту, бою глиняної цегли, шамоту	Керамзитові	10	M50-200	40	0,6	—

Таблиця 8.5

Приблизні склади жаростійких бетонів

Тонкомелена добавка	Заповнювачі	Витрати матеріалів, кг/м ³				Максимальна температура служби бетону ненесучої футеровки, °С
		цемент	тонкомелена добавка	заповнювачі		
				дрібний	крупний	
З золи-виносу, глиняної цегли, пемзи, доменного гранульова- ного шлаку	Андезитовий, базальтовий, діоритовий, діабазовий	350	120	850	900	700
	Відвальний доменний шлак	350	120	900	1000	700
	Арктикський туф	350	120	500	600	700
З паливного шлаку	З паливного шлаку	350	120	500	600	800
Зі звичайної глиняної цегли	Зі звичайної глиняної цегли	350	120	500	600	900
З шамоту класу В, лесу, золи-виносу	З шамоту класу В	350	120	650	700	1000-1100
З шамоту класу В	З шамоту класу В	350	700	650	700- 750	1100-1200

Густина укладених жаростійких бетонів, залежить від виду заповнювача і становить в середньому, кг/м³: на хроміті – 3000, магнезиті – 2600, базальті, діабазі, андезиті – 2400, шамоті – 2200, цегляному щебені – 1800 кг/м³. Для бетонів, що зазнають теплового удару, не використовують магнезитовий заповнювач, який має високий температурний коефіцієнт лінійного розширення, а також обмежують максимальний розмір щебеню – 10...20 мм.

Технологія приготування жаростійких цементних бетонів практично не відрізняється від технології звичайних бетонів.

Конструкції з жаростійких бетонів до введення в експлуатацію повинні бути просушені і виведені на робочу температуру за спеціально призначеним режимом. Швидкість підйому температури при сушінні і першому нагріванні бетону призначається з умови:

$$(\sigma_p + P) < R_p^t, \quad (8.1)$$

де P – тиск пари води; σ_p – розтягуючі температурні напруження; R_p^t - границя міцності нагрітого бетону при розтягу.

При різкому підйомі температури і спільній дії температурно-вологісних напружень та тиску пари води можлива поява у бетоні тріщин і його руйнування. При високій швидкості тріщиноутворення виникає динамічний ефект і руйнування відбувається майже миттєво у вигляді вибуху. Для запобігання появи тріщин у бетоні швидкість підйому температури при першому нагріванні не повинна перевищувати 10...15° С за годину. При повторному нагріванні бетону швидкість підйому температури може збільшуватися до 30° С за годину, а зниження – до 50° С за годину.

8.3. Жаростійкі бетони на алюмінатних цементях та нецементних в'язучих

Бетони на алюмінатних цементях. На алюмінатних – глиноземистому та високоглиноземистих цементях – виготовляють жаростійкі бетони високих класів (И8...И18) за граничною температурою застосування.

Висока жаростійкість алюмінатних цементів зумовлена їх хіміко-мінералогічним складом. Основним мінералом глиноземистого цементу є моноалюмінат кальцію – $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (CA), високоглиноземистих – діалюмінат кальцію $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$ (CA_2). Нормований хімічний склад глиноземистих цементів наведено у табл.8.6.

Бетони на глиноземистому цементі стійкі при температурі до 1300° С, а з заповнювачами з корунду та плавленого оксиду алюмінію до 1600° С та вище. Найбільш висока вогнетривкість досягається при застосуванні високоглиноземистих цементів.

Хімічний склад глиноземистих цементів

Вид цементу	Вміст оксидів у %						
	Al ₂ O ₃ не менше	CaO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	SO ₃	TiO ₂
Глиноземистий цемент (ГЦ)	35	-	-	-	-	-	-
Високоглиноземисті цементи:							
ВГЦ I	60	32	1,0	3,0	1,5	2,0	0,05
ВГЦ II	70	28	1,0	1,5	1,0	2,0	0,05
ВГЦ III	80	18	0,5	0,5	0,5	0,5	0,05

При використанні алюмінатних цементів можуть бути отримані як важкі, так і легкі жаростійкі бетони. Для важких бетонів у якості заповнювачів використовують корунд, шамот, муліт, бій алюмосилікатних виробів та ін.

Позитивними особливостями жаростійких бетонів на алюмінатних цементах є їх висока механічна міцність, що досягається вже в однодобовому віці (бетони на високоглиноземистих цементах тверднуть повільніше), підвищена стійкість при різких коливаннях температури, незначна термічна усадка, невеликий коефіцієнт лінійного розширення при нагріванні і низький коефіцієнт теплопровідності. Властивості бетонів можна додатково поліпшити, вводячи деякі добавки (табл.8.7).

При нагріванні до 800...1100° С міцність бетонів на алюмінатних цементах дещо знижується внаслідок процесів дегідратації. Однак при подальшому нагріванні починається спікання матеріалу і міцність знову збільшується.

Характерні рекомендовані склади жаростійких бетонів на глиноземистому цементі наведені в табл.8.8.

Конструкції з жаростійких бетонів на основі глиноземистого цементу можуть піддаватися дії вогню через 24 години після їх виготовлення, швидкість підйому температури обмежується при нагріванні до 500° С, при подальшому нагріванні вона може збільшуватися.

**Характеристики жаростійких бетонів
на глиноземистому цементі (за даними Т.В. Кузнецової)**

Цемент	Міцність бетонів, МПа				Термо- стій- кість, цикли
	тридобового тверднення	після нагріву		Усадка, %	
		до 100 ⁰ С	до 800 ⁰ С		
Глиноземистий цемент	32,6	36,7	15,3	0,65	20
Те ж, з добавкою шлаків феротитану	32,0	34,5	19,2	0,37	25
Те ж, з добавкою відходів вогнетривких виробів	31,0	32,5	20,6	0,5	28
Те ж, з добавкою технічного глинозему	30,0	32,5	18,7	0,6	28

Вдосконалення ряду властивостей бетонів при дії високих температур досягається при застосуванні барій- та боровмісних алюмінатних цементів.

Таблиця 8.8

**Склади та властивості жаростійких бетонів
на глиноземистому цементі**

Компоненти бетону	Вміст за масою, %	Температура деформацій під навантаженням, °С		Вогнетрив- кість, °С	Лінійна усадка,%
		початок	кінець		
Глиноземистий цемент Шамотний порошок	15...20 80...85	1200- 1350	1300-1400	1450-1500	0,2-0,3
Глиноземистий цемент Хромітовий порошок	7...15 85...93	1280- 1340	1340-1380	1800	1-2
Глиноземистий цемент Хромітовий порошок Магnezитовий порошок	10...15 55...70 20...30	1350	1400	1800	1-2

Жаростійкі бетони на рідкому склі. Для отримання жаростійких бетонів з граничною температурою застосування 800...1600° С застосовують рідке скло.

Промисловістю виготовляються три марки рідкого скла: А - низькомодульне, Б - середньомодульне та В - високомодульне (табл. 8.9).

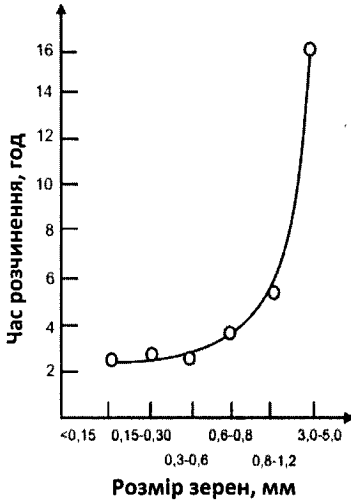


Рис. 8.4. Вплив дисперсності силікат-брили на швидкість розчинення

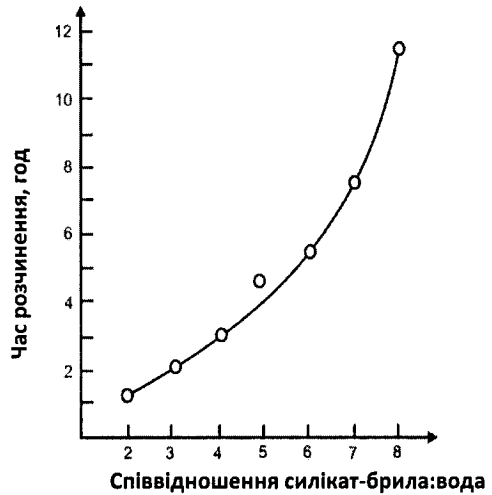


Рис. 8.5. Вплив масового співвідношення силікат-брили та води на швидкість розчинення

Для отримання жаростійких бетонів застосовують рідке скло з силікатним модулем $n=2.4...3$.

Таблиця 8.9

Марки промислових рідких стекел

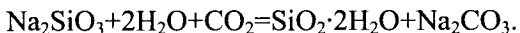
Характеристика скла	Вміст оксидів, %		Модуль n
	SiO ₂	Na ₂ O	
Низькомодульне (марка А)	29,7...30,7	12,3...13,2	2,31...2,60
Середньомодульне (марка Б)	30,8...31,9	11,0...12,1	2,61...3,0
Високomodульне (марка В)	32,0...33,1	9,8...11,0	3,0...3,5

Розчини натрієвого рідкого скла виготовляють густиною 1,36...1,45, калієвого 1,4...1,56 г/см³. При отриманні рідкого скла з

силікат-брили на швидкість розчинення впливає її дисперсність та концентрація у воді (рис.8.4, 8.5)

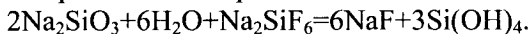
Найкращі в'язучі властивості натрієвого рідкого скла характерні для силікатного модуля 2...3,5, калієвого 2,5...4. При підвищенні силікатного модуля вище 3,3 істотно збільшується водостійкість рідкого скла, яке можна віднести до в'язучих повітряного твердіння. Міцність композитів на основі рідкого скла зростає зі збільшенням густини розчину скла (до 1,5 г/см³ і вище). Разом з тим, зі збільшенням густини різко зростає в'язкість розчинів і ускладнюється отримання легкооброблюваних сумішей.

У закритих ємностях рідке скло не твердне. На повітрі йде повільне тверднення у результаті взаємодії лужного силікату з вуглекислим газом з виділенням гелю кремнієвої кислоти $\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, що утворює штучний камінь. Реакція спрощено відбувається за схемою:



Цей процес відбувається досить повільно через утворення на поверхні практично непроникної плівки.

Найбільш поширений спосіб переведення рідкого скла у твердий стан полягає в додаванні різних реагентів-затверджувачів. Особливе місце серед затверджувачів займають фторсилікати лужних металів. На практиці з цією метою застосовують переважно кремнефторид натрію Na_2SiF_6 . Його взаємодія з рідким склом характеризується проходженням реакції:



Введення порошку Na_2SiF_6 в натрієве рідке скло відразу викликає коагуляцію та гелеутворення. Тому його зазвичай попередньо змішують з наповнювачем, а потім вже з рідким склом.

Для затвердіння рідкого скла до складу жаростійких бетонів вводять також речовини, що містять двокальцієвий силікат – нефеліновий шлам (попутний продукт переробки нефеліну на глинозем), шлаки виробництв ферохрому, феромарганцю та деякі види сталерафінувальних шлаків, що містять $\gamma\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$.

До складу жаростійких бетонних сумішей, крім в'язучого та затверджувача, входять тонкомелені добавки, заповнювачі та, за необхідності, пластифікатори, регулятори термінів тужавлення та ін. Тонкомелені добавки у бетони на рідкому склі вводять для

підвищення температури застосування, поліпшення легкоукладальності бетонної суміші та забезпечення щільної структури бетону.

Ряд рекомендованих складів бетонів на рідкому склі наведені у табл.8.10.

Орієнтовно витрата рідкого скла на 1 м^3 бетону складає $250...400 \text{ кг/м}^3$. Витрата затверджувача залежить від витрати рідкого скла та складає: для кремнефтористого натрію $0,1...0,2$; нефелінового шламу, розсипного шлаку – $0,3$ частин за масою (при застосуванні тонкомеленої добавки з магнезиту – $0,12$ частин за масою).

При проектуванні складів бетонів витрату рідкого скла обчислюють за формулою:

$$P_{c.p} = V_3 P_3 \rho_{c.p} (K_{\text{над}} - 0,3) \rho_3^0, \quad (8.2)$$

де ρ_3^0 - насипна густина суміші заповнювачів; P_3 - пустотність суміші заповнювачів, $\rho_{c.p}$ - густина рідкого скла; V_3 - витрата суміші заповнювачів; $K_{\text{над}}$ - коефіцієнт надлишку в'язучого тіста.

Таблиця 8.10

Склади жаростійких бетонів на рідкому склі

Гранична температура застосування бетону, $^{\circ}\text{C}$ при одно-сторонньому нагріванні	Тонкомелена добавка	Дрібний та крупний заповнювач	Затверджувач - кремнефторид натрію, кг/м^3	Склад, кг/м^3			
				Рідке скло	мінеральна добавка	пісок	щебінь
1400	магнезит	бій магнезитової цегли	18...20	350	600	600	1150
1000	хроміт	хроміт	30...35	300	700	800	1250
900	шамот	шамот	40...50	400	500	500	750
600	шамот, андезит, діабаз	базальт. діабаз. андезит	35...40	350	500	700	900

Витрата суміші заповнювачів:

$$P_3 = 1000 / \left(\frac{1}{\rho_3} + \frac{P_3 K^{над}}{\rho_3^0} \right), \quad (8.3)$$

де ρ_3 – густина суміші заповнювачів.

Витрата тонкомеленої добавки :

$$P_d = 0,6V_{c.p.} \rho_d, \quad (8.4)$$

где $V_{c.p.}$ - об'єм рідкого скла ($V_{c.p.} = P_{c.p.}/\rho_{c.p.}$); ρ_d – густина матеріалу, з якого виготовлена тонкомелена добавка.

При нагріванні бетонів зниження міцності, зумовлене дегідратацією продуктів твердіння рідкого скла, компенсується спіканням компонентів бетонної суміші. При температурі вище 1000°C у бетонах з'являється розплав, який утворює при охолодженні склзв'язку. Залежно від виду заповнювачів і наповнювачів жаростійкі бетони на рідкому склі поділяють на кремнеземисті, алюмосилікатні та магнезійні. У перших як заповнювачі використовують кварцит і динас, у других - шамот і муллітові матеріали, у третіх - периклаз, магнезійно-шпінельні вогнетриви.

Бетонні суміші на рідкому склі виробляються на місці виконання робіт та час їх укладання від моменту замішування не повинен перевищувати 30 хв.

Для бетонів на рідкому склі з затверджувачами рекомендується температура тверднення не нижче 15°C за відносної вологості не більше 70%. Для прискорення тверднення бетонів можливе застосування електропрогрівання за допомогою листових або пруткових електродів. Максимальна температура прогріву бетону повинна бути $50...100^\circ \text{C}$. тривалість витримки при цій температурі 2...6 год.

Бетони на фосфатних в'язучих. До фосфатних в'язучих належить велика група в'язучих систем, до складу яких входять різні оксиди або інші тонкодисперсні речовини та фосфорна кислота.

Їх поділяють на "прості" в'язучі системи, що включають фосфорну кислоту та мономінеральні сполуки, представлені переважно оксидами, та в'язучі системи з використанням

полімінеральних природних і техногенних продуктів. Вони можуть тверднути за кімнатної температури або при нагріванні.

Тверднення фосфатних в'язучих можливе за умови хімічної взаємодії мінеральних порошків з фосфорнокислим затверднувачем.

Здатність тверднути і перетворюватися в штучний камінь для фосфатів обумовлена процесами поліконденсації, в результаті яких можуть утворюватися структури лінійних, кільцевих і пористих поліфосфатів.

В останні роки розроблено ряд швидкотверднучих і високоміцних фосфатних в'язучих композицій, що мають високу жаростійкість. До них належать, наприклад, *магнійамонійфосфатні цементи*, тверднення яких пов'язане зі взаємодією оксиду магнію з водними розчинами амонійфосфатів. Використання у в'язучих системах амонійфосфатів істотно покращує їх фізико-механічні характеристики. Оксид магнію випаляють при температурі вище 1300° С. Вплив складу на кінетику наростання міцності магнійамонійфосфатних цементів наведено в табл.8.11.

Таблиця 8.11

Вплив складу на міцність магнійфосфатного цементу

Співвідношення MgO/амонію фосфат	Міцність на стиск, МПа		
	1 год	5 год	24 год
1/4	1	3,5	6,5
3/7	1	4,5	7,0
2/3	7	11	12
1	10	18	19
3/2	15	22	22

Магнійамонійфосфатні цементи мають стійкість до дії температури не менше 1000° С.

Високі технічні властивості характерні для в'язучих систем на основі тальку - шаруватого магнезійного силікату з вмістом MgO близько 30%. *Талькофосфатні в'язучі* тверднуть при 140° С і дозволяють отримувати матеріали з високою міцністю на стиск та вогнетривкістю 1450° С. Ці показники можуть бути поліпшені при сухому і особливо гарячому пресуванні.

Великою групою фосфатних в'язучих матеріалів є матеріали з активними компонентами, що містять глинозем. Із

8. Жаростійкі бетони

застосуванням *алюмофосфатної зв'язки* $Al(H_2PO_4)_3$ та кварцових, шамотних та інших вогнетривких компонентів можна отримати високоякісні жаростійкі бетони. Вогнетривкість, наприклад, *динасофосфатних бетонів* досягає $1750^\circ C$, а температура початку деформацій – $1660^\circ C$.

Типові показники *шамотнофосфатних бетонів*:

- міцність на стиск після сушіння при $300^\circ C$ – 40 МПа,
- після випалу при $800^\circ C$ – 80 МПа,
- після випалу при $1500^\circ C$ – до 145 МПа,
- усадка після сушіння – до 0,3...0,6%,
- вогнетривкість – до $1750^\circ C$,
- температура початку деформацій під навантаженням – до $1450^\circ C$.

Високі вогнетривкі та фізико-механічні властивості мають *корундові, магнезійні та цирконійфосфатні матеріали*, які одержують з використанням різних видів фосфатних зв'язок (табл.8.12).

Таблиця 8.12

Властивості цирконійфосфатних бетонів
(за даними Л.Г. Судакаса)

Вид зв'язки	Міцність на стиск, МПа, при термообробці			Термостійкість ($1300^\circ C$ – повітря), теплозміни при термообробці	
	$100^\circ C$	$800^\circ C$	$1600^\circ C$	$100^\circ C$	$1600^\circ C$
H_3PO_4	7,0	92	130	13	6
$Al_2(HPO_4)_3$	50	79	106	33	12
$Al(H_2PO_4)_3$	62	59	111	47	3
$Mg(H_2PO_4)_2$	51	45	-	40	-
$Ca(H_2PO_4)_2$	35	21	106	66	27

Використання фосфатних в'яжучих дозволяє отримувати жаростійкі бетони, що зберігають при високих температурах сталість об'єму без збільшення кількості рідкої фази та необхідну стійкість вогнетривких виробів та футеровок.

9. ХІМІЧНО СТІЙКІ БЕТОНИ

Цементні бетони схильні до корозійного впливу кислот та ряду інших хімічних речовин і при їх дії повинні бути надійно захищені або замінені матеріалами, що мають достатню стійкість у певному агресивному середовищі. Кардинальне підвищення стійкості до дії мінеральних і органічних кислот, солей, розчинників і нафтопродуктів, а також інших агресивних речовин досягається при застосуванні хімічно стійких бетонів, до яких відносяться бетони на різних полімерних в'язучих і рідкому склі (ДСТУ БВ.2.7-288:2011).

Критерієм хімічної стійкості бетонів є коефіцієнт хімічної стійкості ($K_{x.c}$), що характеризує зміну міцності зразків на розтяг при згині після витримування протягом певного часу в агресивному середовищі:

$$K_{x.c} = \frac{R_{\tau}}{R_0}, \quad (9.1)$$

де R_0 і R_{τ} – відповідно значення границі міцності контрольних зразків і таких, що витримувалися у середовищі протягом τ , діб.

Залежно від стійкості в агресивних середовищах хімічно стійкі бетони поділяють на:

- високостійкі $K_{x.c} \geq 0,8$;
- стійкі $0,5 \leq K_{x.c} < 0,8$;
- відносно стійкі $0,3 \leq K_{x.c} < 0,5$;
- нестійкі $K_{x.c} < 0,3$.

Залежно від виду в'язучого хімічно стійкі бетони поділяються на фуранові, поліефірні, фураново-епоксидні, карбамідні, акрилові, на основі рідкого скла. Крім зазначених бетонів, для антикорозійних робіт застосовують сірчані бетони, в'язучим у яких служить сірка з модифікуючими добавками.

Хімічно стійкі бетони отримують як на щільних, так і на пористих заповнювачах. Заповнювачі та наповнювачі бетонів повинні мати кислотостійкість не нижче 97...98%.

Загальні якісні показники хімічно стійких бетонів наведені в табл.9.1.

Таблиця 9.1

Марки хімічно стійких бетонів

Марки	Важкі бетони	Легкі бетони
за міцністю на стиск	M300...M1100	M300...M800
за міцністю на осьовий розтяг	P30...P100	P20...P50
за густиною	$D \geq 2200$	D1500...D1800
за морозостійкістю	F300...F1000	

9.1. Полімерні бетони

До групи полімерних входять бетони, роль в'язучих в яких виконують синтетичні полімери. Найбільше застосування для хімічно стійких бетонів знаходять фуранові (смоли ФАМ, ФА), поліефірні (смола ПН-1) та карбамідні (смола КФ-Ж) полімерні в'язучі. Застосовують також композиційні фураноепоксидні (ФАЕД-20) та акрилові смоли (мономер ММА).

Затвердіння полімербетонів здійснюють, як правило, при введенні затверджувачів.

До фуранових смол належать продукти конденсації фурфуролу та фурфурилового спирту з фенолами та кетонами. Фуранові смоли вигідно відрізняються від інших значно меншою вартістю.

Як в'язуче для полімербетонів поширення набув фурфуролацетоновий мономер (ФА) - рідина з температурою кипіння 160...240° С, нерозчинна у воді, але розчинна в кетонах і складних ефірах. Затвердіння мономера ФА та інших фуранових смол (ФАМ, 2ФА, 4ФА та ін.) відбувається у присутності сульфокислот (бензолсульфокислоти БСК), сульфохлоридів та ін.

Обов'язковою вимогою до заповнювачів на основі фуранових смол є їх тривала стійкість у кислому середовищі, враховуючи присутність в полімербетоні кислого

затверджувача. Використання заповнювачів, що реагують з кислотами (вапняки, доломіти, азбест та ін.), недопустиме.

Поліефірні смоли є продуктами поліконденсації кислот і спиртів, що містять реакційоздатні подвійні зв'язки між вуглецевими атомами. Тверднуть вони в більшості випадків за допомогою гідроперекису ізопропилбензолу або перекису метилетилкетону та прискорювачів-активаторів (10%-го

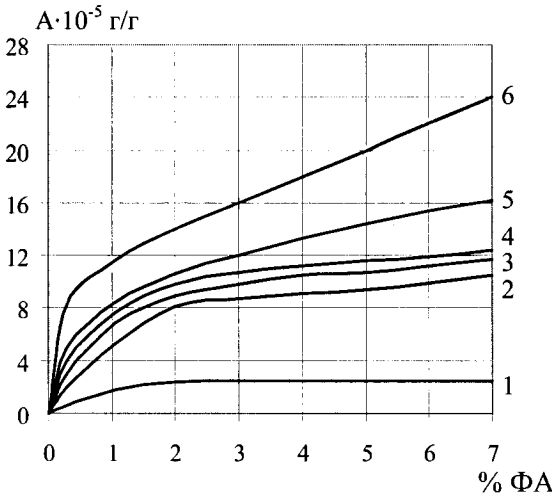


Рис.9.1. Адсорбція мономера ФА з ацетонного розчину мінералами:
 1 – кварц; 2 – лабрадор; 3 – діопсид; 4 – рогова обманка; 5 – магнетит; 6 – графіт

для них є органічні і неорганічні кислоти, деякі солі (хлориди цинку та амонію), а також солянокислий анілін. Останній застосовують найчастіше.

Суттєвий вплив на властивості полімербетонів мають дисперсні мінеральні наповнювачі. Наповнювачі здатні до порівняно інтенсивного адсорбування і адгезійної взаємодії з синтетичними полімерами (рис.9.1), що відкриває можливості регулювання властивостей полімербетонів. Так, введення наповнювачів, що

розчину нафтенату кобальту в стиролі). Найбільш дешевою і доступною є поліефірмалеїнат на смола ПН-1.

Карбамідні смоли отримують у результаті поліконденсації сечовини та формальдегіду у водному або водно-спиртовому середовищі. Каталізаторами затвердіння

містять вуглець, (до 5%) в композиції на основі мономера ФА суттєво підвищує їх водо- і морозостійкість.

Такі наповнювачі як андезит, кварцове борошно та ін. взаємодіють з функціональними групами поліефірних смол, утворюючи ковалентні або водневі зв'язки, і сприяють підвищенню міцності. Для утворення хімічних зв'язків на границі розділу фаз полімер-наповнювач використовують адсорбційне модифікування, тобто зміну молекулярних властивостей поверхні наповнювачів введенням ПАР.

Для кожного виду синтетичного полімеру існують строго визначений ступінь наповнення та величина питомої поверхні наповнювача, що забезпечують максимальну міцність матеріалу.

Таблиця 9.2

Приблизні склади полімербетонів на основі мономера ФА
(за даними В.В. Патурова)

Складові	Склад, % за масою				
	1	2	3	4	5
Щебінь:					
гранітний	51	-	-	-	-
кварцовий	-	52	-	-	-
андезитовий	-	-	50	-	-
аглопоритовий	-	-	-	-	38
з кислототривкої кераміки	-	-	-	35	-
Пісок:					
кварцовий	25,5	-	-	-	-
графітовий	-	-	-	30,4	28,3
борошно:					
кварцове	11	-	-	-	-
андезитове	-	33,6	35,6	-	-
графітове	-	-	-	13	15
Мономер ФА або його модифікації	10,6	12	12	18	15,5
Бензосульфокислота (БСК)	2	2,4	24	3,6	3,2

Як крупний заповнювач до складу полімербетонів вводять щебінь, гранулометричний склад якого підбирається виходячи з умов щільної упаковки, розмірів і форми виробів і

конструкцій. Не допускається застосування щебеню з осадових порід.

Поширені склади полімербетонів на основі мономера ФА наведені в табл.9.2.

Розрахунки складів полімербетонів можна виконувати, представивши їх як двокомпонентну систему: наповнена полімерна мастика – крупний заповнювач.

Витрата мінімально необхідної кількості полімерного зв'язуючого для мастики по В.В.Патурову можна знайти за формулою:

$$P_m = \frac{S_n m_n \rho_n \delta}{100}, \quad (9.2)$$

де P_m – витрата полімерного зв'язуючого для мастики, кг; S_n – питома поверхня наповнювача, м²/кг; m_n – маса наповнювача, кг; ρ_n – густина зв'язуючого, кг/дм³; δ – товщина плівки зв'язуючого ($\delta \approx 15 \cdot 10^{-7}$ м).

Співвідношення зв'язуюче:наповнювач, обчислене за формулою (9.2), становить 1:1,5...1:2. Мастики з такою кількістю наповнювачів мають максимальну міцність.

За даними різних дослідників міцність полімербетонів на стиск на фуранових, поліефірних і епоксидних смолах коливається в інтервалі 50...125, на згин 15...40 і розтяг 8...16МПа

Застосовують два способи твердіння полімербетонів: "на холоді", тобто при звичайних температурах і при підігріві до 40...80°С. У першому випадку матеріал досягає необхідної міцності через декілька днів, у другому – вже через кілька годин після укладання. В інтервалі температур до 100°С границя міцності та модуль пружності зменшуються пропорційно підвищенню температури. Для полімербетонів на мономері ФА зі збільшенням температури від 20 до 100°С міцність і модуль пружності знижуються на 40%. При подальшому збільшенні температури міцність і модуль пружності зменшуються більш інтенсивно. Істотний вплив на міцність мають вміст затверджувача та умови тверднення полімерного зв'язуючого, тривалість твердіння (рис.9.2, 9.3).

Велика відмінність в значеннях коефіцієнта температурного розширення полімеру та мінеральних компонентів (у 5...10 разів) призводить до виникнення значних напружень на границі розділу фаз при зміні температури. Максимальна температура експлуатації виробів та конструкцій з полімербетону 150...180° С.

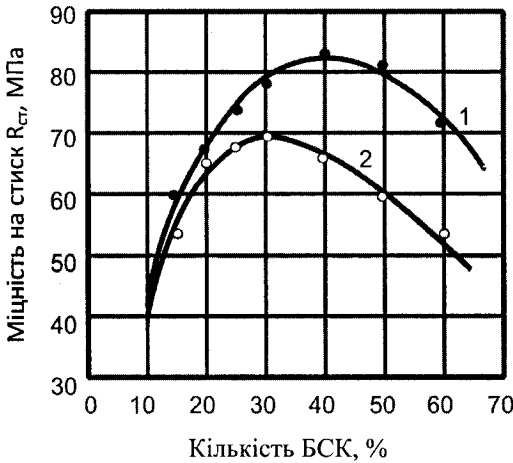


Рис. 9.2. Вплив кількості бензосульфокислоти(БСК) на міцність полімербетону на основі мономеру ФА
1- у стабільних температурно-вологісних умовах;
2- після витримування протягом 28 діб у морській воді

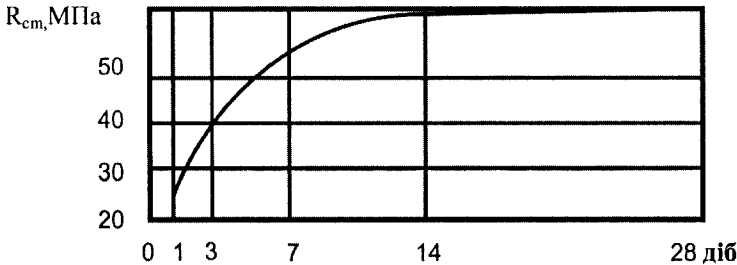


Рис. 9.3. Залежність граничної міцності на стиск епоксидного полімербетону від часу зберігання (температура 20° С)

Мінімально допустимі значення коефіцієнта хімічної стійкості полімербетонів у різних агресивних середовищах наведені в табл. 9.3, 9.4. З підвищенням концентрації кислот коефіцієнт хімічної стійкості полімербетонів, зазвичай,

підвищується, що можна пояснити зменшенням кількості води в розчинах і, відповідно, зниженням ефекту адсорбційного зниження міцності.

Таблиця 9.3

Мінімально допустимі значення коефіцієнта хімічної стійкості ($K_{х.с}$) полімербетонів по відношенню до кислот при 20° С

Вид агресивного середовища	Концентрація середовища, %	Вид зв'язуючих, що застосовуються				
		Фурфурол-ацетонова смола ФАМ (ФА)	Фураноепоксидна смола ФА-ЕД-20	Поліефірна смола ПН-1	Карбамідна смола КФ-Ж	Метил-метакрилат ММА
1. Мінеральні кислоти:						
Азотна	3	-	-	0,5	0,8	0,7
Сірчана	3	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
	30	0,8	0,5	0,8	-	0,8
	70	0,8	0,3	0,5	-	0,5
Соляна	5	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
	36	0,8	0,5	0,8	-	0,8
Фосфорна	5	0,8	0,6	0,8	0,8	-
2. Органічні кислоти:						
Молочна	35	0,8	0,6	0,8	0,5	0,8
Лимонна	10	0,8	0,6	0,8	0,5	0,8
Оцтова	5	0,7	0,6	-	-	0,8

Полімербетони у порівнянні з бетонами на неорганічних в'язучих мають більш високу усадку, повзучість (рис.9.4), чутливість до температурних перепадів, а також більш низькі значення модуля пружності. Лінійна усадка фуранових полімербетонів сягає до 1 мм/м, практично припиняючись через 6...7 діб при твердненні в нормальних умовах і через 1...2 доби при нагріванні. У полімербетонах на поліефірних смолах усадка приблизно така ж як і при застосуванні мономера ФА, а на епоксидних близька до усадки звичайних цементних бетонів.

Повзучість полімербетонів за нормальної температури починає проявлятися під навантаженням, величина якого

9. Хімічно стійкі бетони

становить 40...50% від руйнівного, а при 60...90° С – під навантаженням у 4 рази меншим.

Таблиця 9.4

Мінімально допустимі значення коефіцієнта хімічної стійкості полімербетонівк солям,основам,розчинникам та нафтопродуктам

Вид агресивного середовища	Концентрація середовища, %	Вид зв'язуючих				
		Фурфурол-ацетонова смола ФАМ (ФА)	Фурано-епоксид на смола ФАЕД-20	Поліефірна смола ПН-1	Карбамідна смола КФ-Ж	Метил-метакрилат ММА
1. Соли та основи:						
Водний розчин аміаку	10	0,8	0,8	0,6	0,6	0,8
	25	0,8	0,8	-	-	0,8
Їдкий натрій	1	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
	10	0,8	0,6	0,6	-	0,8
Мідний купорос	5,3	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
2. Хлористі розчини солей заліза, кальцію, магнію, натрію	насичені	0,8	0,8	0,8	0,6	0,8
3. Розчинники						
Ацетон	100	0,7/0,6*	0,7	0,8	0,8	-
Бензол, толуол	100	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
етиловий спирт	96	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
4. Нафтопродукти (дизельне паливо, бензин, керосин, мазут)	100	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8

* Для бетонів на пористих заповнювачах.

При застосуванні полімербетонів необхідно враховувати підвищене тепловиділення, що має місце при твердінні термореактивних смол. Збільшення витрат зв'язуючого до 12...14% у багатьох випадках призводить до появи тріщин.

Ненаповнений полімер ФА має недостатню водо- та морозостійкість. Введення наповнювачів і особливо графітового істотно покращує ці властивості. Коефіцієнти водо- та морозостійкості полімербетонів оптимальних складів досягають до 0,85...0,90 відповідно після перебування у воді 1 міс. і через 100 циклів заморожування і відтавання. Практично повністю водостійкими та високоморозостійкими є композиції на основі епоксидних смол.

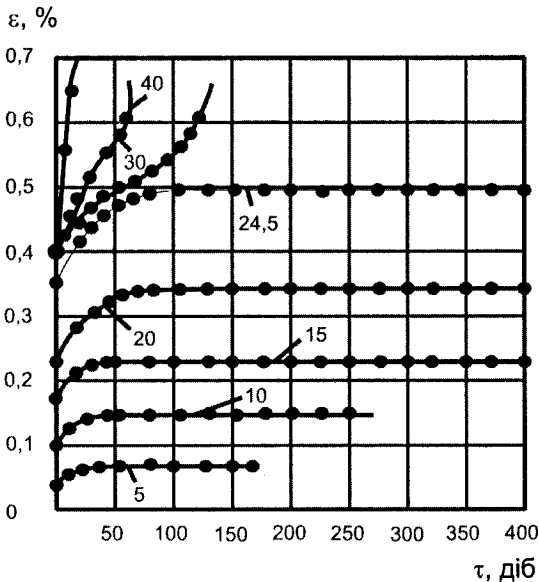


Рис.9.4. Криві повзучості на стиск зразків-призм з полімербетону ФАМ. Цифри на кривих — навантаження, МПа

20...25 разів вище, ніж для цементного бетону. Ударна міцність полімербетонів у 5...10 разів вище, ніж у цементних.

Усереднені показники фізико-механічних властивостей полімербетонів на щільних заповнювачах наведені в табл.9.5.

Позитивними особливостями полімерних бетонів є їх висока зносостійкість та ударна міцність. Опір стиранню

полімербетонів залежно від виду полімерних зв'язуючих змінюється від 0,001 до 0,04 г/см². Для полімербетонів на мономері ФА та кварцових заповнювачах він в 2...5 разів, а на гранітних заповнювачах у

Таблиця 9.5

Усереднені показники фізико-механічних властивостей
полімербетонів

Фізико-механічні властивості	вид зв'язуючих				
	ФАМ (ФА)	ФАЕД	ПН-1	КФ-Ж	ММА
Міцність, МПа					
при стиску	70...90	90...110	80...100	50...60	70...90
при розтягу	5...8	9...11	7...9	3...4	10...13
Модуль пружності при стиску, МПа	(20...32)·10 ³	(32...38)·10 ³	(28...36)·10 ³	(10...14)·10 ³	(10...15)·10 ³
Коефіцієнт Пуассона	0,2...0,24	0,26...0,28	0,2...0,22	0,22...0,24	0,26...0,28
Питома ударна в'язкість, Дж/см ²	0,15...0,25	0,35...0,45	0,1...0,2	0,15...0,25	-
Лінійна усадка, %	0,1	0,05...0,08	0,2...0,25	0,2...0,22	0,15...0,20
Водопоглинання за 24 год	0,05...0,03	0,01	0,05...0,03	0,1...0,03	0,01
Термостійкість за Мартенсом, °С	120...140	120	80	100...120	60
Теплопровідність, Вт/(м·°С)	0,55...0,85	0,66...0,68	0,29...0,58	0,44...0,58	0,66...0,85
Морозостійкість, цикли, не нижче	300	500	300	200	500
Коефіцієнт термічного розширення, 1/°С	(12...15)·10 ⁻⁶	(10...14)·10 ⁻⁶	(14...18)·10 ⁻⁶	(13...15)·10 ⁻⁶	(12...16)·10 ⁻⁶
Стіраність, г/см ²	0,018...0,21	0,005...0,1	0,02...0,03	0,06...0,1	-

Полімербетони поєднують високу хімічну стійкість з міцністю і довговічністю, що відкриває можливість використання їх як конструкційного матеріалу при дії хімічно агресивних середовищ. Висока міцність цих матеріалів у поєднанні з гарним зчепленням їх зі сталевією арматурою

дозволяє виготовляти сталеполімербетонні конструкції широкої номенклатури.

Найбільший економічний ефект досягається при використанні несучих хімічно стійких сталеполімербетонних конструкцій на промислових підприємствах з агресивним впливом різних технологічних середовищ.

Технологія полімербетонів і виробів на їх основі близька до технології цементних бетонів. Тверднення відформованих виробів відбувається при температурі навколишнього повітря не нижче 18°C і вологості $(70\pm 5)\%$ протягом 28...30 діб. Для прискорення процесу тверднення виробу піддають термообробці в термокамерах сухого прогріву при температурі 80°C не менше 14 год. Полімербетони на основі метилметакрилату (ММА) термічній обробці не піддаються.

9.2. Бетони на основі рідкого скла та сірки

З неорганічних хімічно стійких бетонів промислове застосування отримали бетони на основі рідкого скла. Продукт тонкого подрібнення суміші кремнефториду натрію та кварцового піску, що замішується водним розчином силікату натрію або калію, відомий як *кислототривкий цемент*. Хімічно стійкі (кислототривкі) бетони отримують із суміші кислототривкого цементу та заповнювачів з кислотостійкістю не менше 97...98%.

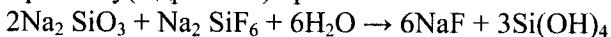
Замість кварцового піску до складу кислототривкого цементу можна вводити інші кислотостійкі порошки, втрата маси яких при кип'ятінні в кислоті не перевищує 7%. Для замішування цементу використовують зазвичай розчин силікату натрію густиною 1,34...1,38 г/см³ у кількості 25...30% маси піску. Вміст Na_2SiF_6 у суміші беруть в межах 4...8% маси цементу. Він залежить від призначення цементу: для виготовлення кислототривких замазок вміст Na_2SiF_6 приймають $4 \pm 0,5\%$ (цемент I типу), розчинів і бетонів $8 \pm 0,5\%$ (цемент II типу).

Початок тужавлення цементу I типу повинен наступати не раніше 40 хв, II типу – 20 хв. Кінець тужавлення для обох

типів цементу має наступати не пізніше 8 год. від початку замішування. Міцність при розтягуванні зразків 28-добового повітряного тверднення після кип'ятіння їх протягом 1 год в 40%-му розчині сірчаної кислоти повинна бути не менше 2 МПа, а зниження міцності після кип'ятіння у порівнянні з міцністю зразків, що не піддавалися кип'ятінню в кислоті, не повинно перевищувати 10%.

Крім цих показників, нормуються вміст SiO_2 у кварцовому піску (більше 95% SiO_2), пористість цементного каменю та тонкість помелу. Залишок на ситі №008 повинен бути не більше 10%, ситі №0056 – не більше 30%.

Тверднення кислототривкого цементу відбувається в результаті хімічної взаємодії кремнефториду натрію та висококонцентрованого розчину рідкого скла з утворенням колоїдного розчину (гідрогелю) кремнієвої кислоти.



Гідрогель, що утворюється, здатний до поліконденсації з виділенням води і формуванням структури з кремнекисневих зв'язками. Поліконденсація прискорюється при сушінні або радіаційному впливі на цементний камінь.

Із застосуванням кислототривкого цементу виготовляють *полімерсилікатні бетони*, до складу яких також входять крупний заповнювач (гранітний щебінь), дрібний заповнювач (кварцовий пісок) та спеціальні добавки пластифікаторів, ущільнювачів, гідрофобізаторів та ін.

Типові склади полімерсилікатних бетонів та їх усереднені фізико-механічні властивості наведені в табл. 9.6 і 9.7.

Щільні полімерсилікатні бетони, призначені для роботи в умовах впливу кислот і насичених розчинів хлоридів металів, характеризуються коефіцієнтом стійкості більше 0,7, у водному розчині аміаку (10...25%) – більше 0,5; в органічних розчинниках і нафтопродуктах – більше 0,8. Низьку хімічну стійкість полімерсилікатні бетони виявляють у водних розчинах лугів.

Таблиця 9.6

Рекомендовані склади полімерсилікатних бетонів

Складові	Склад 1		Склад 2	
	Маса,%	кг на 1 м ³	Маса,%	кг на 1 м ³
Гранітний щебінь 20...40 мм	36...38	792...836	48...50	1152...1200
Пісок кварцовий 0,15...5 мм	27...29	594...638	22...24	528...575
Наповнювач (<0,15 мм)	17,5...18,5	385...407	14,5...15,5	248...372
Рідке скло натрієве, густиною 1,40...1,42 г/см ³	13,5...14,5	298...319	10,5...11,5	252...276
Кремнефтористий натрій	2,4	53,0	1,6	38
Фуриловий спирт	0,5	11,0	0,35	8,4
Катапін	-	-	0,03	0,7
Сульфанол	-	-	0,02	0,5
Гідрофобна кремнійорганічна рідинаГКР-10	0,1	2,2	-	-

Таблиця 9.7

Фізико-механічні властивості полімерсилікатних бетонів

Показники	Середнє значення	Показники	Середнє значення
Міцність на розтяг, МПа, не менше	3	Теплопровідність Вт/(м·°С) не більше	0,5 8
Модуль пружності при стиску, МПа, не менше	$2,0 \cdot 10^4$	Морозостійкість, циклів, не менше	80
Коефіцієнт Пуассона, не більше	0,2	Коефіцієнт лінійного Теплового розширення 1°С, не більше	$8 \cdot 10^{-6}$
Питома ударна в'язкість Дж/см ² , не менше	0,15		
Лінійна усадка,% не більше	0,15	Стираність, г/см ² , не більше	0,4
Водопоглинання,% не більше	6		
Термостійкість за Мартенсом, °С, не більше	350	Показник горючості, не більше	0,8

Значення коефіцієнта хімічної стійкості полімерсилікатних бетонів у різних середовищах наведені в табл.9.8.

Таблиця 9.8

Значення коефіцієнта хімічної стійкості для щільних полімерсилікатних бетонів

Вид агресивного середовища	Концентрація середовища, %	$K_{х,с}$ при 20° С не менше
1. Мінеральні кислоти:		
Азотна	3	0,7
	50	0,8
Сірчана	3	0,7
	30	0,8
	70	0,8
Соляна	96	0,8
	5	0,7
Фосфорна	36	0,8
	5	0,7
2. Органічні кислоти:		
Молочна	35	0,8
Лимонна	10	0,8
Оцтова	5	-
3. Солі і основи:		
Водний розчин аміаку	10	0,5
	25	0,5
Їдкий натрій	1	0,3
	10	-
Мідний купорос	5,30	0,7
4. Хлористі розчини солей заліза, кальцію, магнію, натрію	насичені	0,7
5. Розчинники		
Ацетон	100	0,8
Бензол, толуол	100	0,8
Етиловий спирт	96	0,8
6. Нафтопродукти (дизельне паливо, бензин, гас, мазут)	100	0,8

Полімерсилікатні матеріали застосовують для виготовлення конструкцій різного призначення, монолітних та штучних кислотостійких футеровок.

Поліпшення властивостей матеріалів на основі рідкого скла, та інтенсифікація гелеутворення, кольматація пор,

збільшення адгезійної здатності досягається введенням ряду добавок: нефелінового шламу, доменних і ферованадієвих шлаків, алуніту, перліту та ін. Ефективні також органічні добавки такі як фурфуріловий спирт, фенольно-резольні смоли, кремнійорганічна рідина ГКР-94, технічні лігносульфанати та ін. Добавки, покращуючи структурутворення полімерсилікатних матеріалів, збільшують їх міцність, непроникність та ін.

Кислотостійкі бетони та інші антикорозійні композиції виготовляють також на основі *сірчаного цементу* -- термопластичного в'язучого, яке отримують, вводючи в розплавлену сірку добавки тонкодисперсних наповнювачів і пластифікаторів. Як наповнювачі застосовують мелені кварцовий пісок, базальт, діабаз, андезит та інші кислотостійкі матеріали, пластифікатори – тіокол, термоплен та ін.

При оптимальному ступені наповнення сірка переходить у більш однорідний і дрібнокристалічний стан, що забезпечує більш високі показники міцності сірчанних цементів і бетонів. Питома поверхня наповнювачів знаходиться в межах 2500...3000 см²/г. Для зниження горючості сірчанних цементів в їх склад вводять добавки антипиренів.

Температура плавлення сірки 112,8° С, займання сірки відбувається при температурі 247...266° С. До 95,6° С стійка зазвичай жовта сірка з густиною 2,07 г/см³, що кристалізується в ромбічній системі. При температурі вище 95,6°С утворюються стійкі кристали моноклінної сірки. При охолодженні тверда фаза містить сірку двох типів: моноклінну та ромбічну. Кристали ромбічної сірки у звичайних умовах є більш стійкими на повітрі і не розчиняються у воді. Вони також погано розчиняються в спирті і ефірі, легше в бензолі та нафті, найкраще – у сірководні. Міцність сірчаного цементу на стиск становить 40...55 МПа, на згин 8...12 МПа.

Оптимальний температурний інтервал, у якому міцність сірки максимальна, 30...40°С. З часом моноклінна сірка перетворюється в орторомбічну, що супроводжується зростанням міцності.

Сірка піддається дії лугів. Вона реагує з Ca(OH)₂ і CaCO₃, при цьому в присутності води утворюються кристалічні

продукти реакції, що викликають збільшення об'єму і знижують міцність сірчаних бетонів. Негативно на міцність затверділої сірки впливає також сірководень.

Для отримання сірчаного цементу найбільш ефективна алотропна форма сірки, що отримала назву пластичної або полімерної. Вона утворюється при різкому охолодженні сірки, розплавленої при 130...200°С. Молекули *полімерної сірки* утворюють довгі спіралі, що містять $10^4...10^5$ атомів і мають масу 18-73 тис.у.о. При звичайній температурі полімерна сірка поступово переходить у звичайну ромбічну форму і для її стабілізації вводять деякі добавки – галогени, терпентин, соснову олію та ін. Полімерна сірка нерозчинна в органічних розчинниках, має більш високу міцність і кращу адгезію до мінеральних заповнювачів і наповнювачів.

При отриманні хімічно стійких бетонів сірчаний цемент нагрівають до 145...155°С та змішують із заповнювачами. Оптимальні склади сірчаних бетонів у % за масою знаходяться в наступних межах: сірка – 12...15, щебінь – 50, пісок – 22...24, наповнювач – 11...12, пластифікуючі добавки – 2.

Бетони на основі сірчаного цементу характеризуються середньою густиною 2300...2400 кг/м³ і границею міцності на стиск 30...35 МПа. Сірчаний бетон набирає основну міцність менш, ніж за 1 добу. Відношення міцності на розтяг при згині до міцності на стиск для нього становить приблизно 1:6, в той час як у цементного бетону цей показник коливається в діапазоні 1:8...1:10. Основні фізико-механічні властивості сірчаних бетонів за даними В.С. Рамачандран наведені нижче:

міцність на стиск, МПа	28...70
міцність на розтяг, МПа	2,8...8,3
модуль пружності, МПа·10 ⁻³	20...45
коефіцієнт температурного розширення, 1/°С(·10 ⁻⁶)	8...35
теплопровідність. Вт/(м·°С)	0,4...2

Для зменшення внутрішніх напружень, що виникають у результаті алотропних переходів сірки під дією температурних перепадів, впливу сонячної радіації, у сірчані цементи та бетони вводять пластифікуючі та структуруючі добавки.

Пластифікатори забезпечують також значне поліпшення деформативних властивостей бетону.

До позитивних особливостей сірчаних бетонів належать здатність затвердівати при від'ємних температурах і під водою, можливість повторного використання при нагріванні. Вони мають високу стійкість до кислот і солей, підвищену водонепроникність, при оптимальних складах достатню атмосферо- і морозостійкість. Крім технічної сірки для виробництва сірчаних бетонів можуть використовуватися сірковмісткі відходи промисловості і сірчані руди. Без істотної втрати міцності сірчані бетони можуть експлуатуватися при температурі до 80 °С. Подальше збільшення температури приводить до різкого падіння міцності, яка при 110 °С становить близько 50% початкової.

Міцність сірчаних бетонів істотно знижується при циклічній зміні температури. Підвищення їх стійкості при температурних впливах досягається при введенні наповнювачів, що містять сульфід заліза.

Для сірчаних бетонів характерна висока повзучість, обумовлена поліморфними перетвореннями сірки під напругою і переміщенням кристалів. Сірчані бетони мають більш високу межу витривалості, ніж цементні.

По хімічній стійкості сірчані бетони не поступаються більшості видів полімербетонів, а по вартості, як правило, значно дешевші. При достатній щільності сірчані бетони захищають арматуру від корозії. Для підвищення їх ударної міцності, а також міцності при розтягуванні і згині вводять скляні волокна, а також волокна з полімерних матеріалів.

З сірчаних бетонів можливе виготовлення як збірних, так і монолітних конструкцій. Їх можна застосовувати при різних видах ремонтних робіт.

Приготування сірчаних бетонів здійснюють у змішувачі при підвищеній температурі. Заповнювачі і мінеральне борошно підігрівають у сушильному барабані до 160⁰С ± 5⁰С. В змішувач подається розплавлена сірка з полімерними пластифікуючими добавками. Вироби можуть виготовлятися з допомогою віброформування. Форми нагрівають до 140...150⁰С.

10. РОЗШИРНІ І НАПРУЖУЮЧІ БЕТОНИ

Тверднення бетонів і розчинів на цементах загальнобудівельного призначення на повітрі супроводжується усадкою. Об'ємні усадочні деформації можуть бути однією з причин, які викликають появу в матеріалах тріщин, які знижують їх довговічність. Особливо небезпечні усадочні тріщини в захисному шарі бетону залізобетонних конструкцій. Усадка бетону знижує ефективність попереднього напруження арматури. Зменшення наслідків усадки може досягатися рядом конструктивних заходів – збільшенням насиченості конструкцій арматурою, улаштуванням температурно-усадочних швів та ін., а також застосуванням безусадочних і розширних цементів.

Необхідність застосування розширних розчинів і бетонів виникає при омоноличуванні збірних залізобетонних елементів, відновленні бетонних і залізобетонних конструкцій, гідроізоляції підземних споруд, зведенні ємностей для зберігання нафти та газу, влаштуванні покриттів підлог, доріг та аеродромів і ін..

Залежно від величини енергії розширення розрізняють безусадочні, розширні і напружуючі цементы, бетони і розчини на їх основі.

10.1. Безусадочні і розширні бетони

Основним способом отримання безусадочних і розширних бетонів є застосування спеціальних цементів, які за класифікацією Г.Лосьє, поділяють на види залежно від показника вільного розширення зразків при зберіганні їх у воді:

цементи	розширення, мм/м
<i>безусадочні</i>	2...5
<i>слаборозширні</i>	5...6
<i>середньорозширні</i>	8...10
<i>сильнорозширні</i>	12...15

На теперішній час розроблені десятки видів безусадочних і розширних цементів, які отримують на основі портландцементу, глиноземистого цементу та їх композицій. До

складу таких цементів входять розширні компоненти і деякі добавки. У більшості цементів розширення викликається утворенням гідросульфоалюмінатів кальцію, гідратацією оксидів кальцію і магнію, реакцією утворення активної газової фази.

О.С.Шейкіним і Т.Ю. Якуб розроблена технологія безусадочних розчинів і бетонів на основі портландцементу з введенням вапна в кількості 10% за СаО у воду замішування, а ГKR-94 (0,1%) при помелі цементу. При цьому цемент набуває гідрофобність і не втрачає активність при тривалому зберіганні.

Лінійне розширення розчинових зразків на основі даного цементу складу 1:2 за масою при В/Ц= 0,5 досягає 0,002...0,05% при твердненні у повітряно-вологих умовах. Розширення зразків розчину закінчується на 14 добу і стабільно зберігається протягом року. При зниженні витрати цементу і підвищенні водоцементного відношення величина розширення зменшується. Міцність розчину на гідрофобізованому цементі з добавкою до 10% СаО вища міцності розчину без добавок як при повітряному, так і водному твердненні. Наявність у гідрофобізованому цементному камені рівномірно розподілених замкнених повітряних пор позитивно впливає на морозостійкість бетонів. При пропарюванні виробів на безусадочному гідрофобізованому цементі бажано для попередження зниження міцності застосовувати м'які, низькотемпературні режими теплової обробки з подовженою попередньою витримкою.

Безусадочні бетони і розчини можуть бути отримані також при додаванні до портландцементу оксиду магнію або випаленого доломіту. Розширення таких складів обумовлено збільшенням об'єму гідроксиду магнію при його утворенні і кристалізації у початковий період тверднення цементу. При 5%-ому дозуванні доломіту, випаленого при 700° С, розширення розчину складу 1:3 за даними П.П. Буднікова і З.С. Косаревої досягає при водному зберіганні через 1 добу 0,03%. Подальше розширення розчину при більш тривалому твердненні незначне. При підвищенні температури випалу доломіту до 800° С розширення збільшується до 0,038%, а до 900° С – до 0,084%.

Розширення збільшується також при збільшенні дозування випаленого доломіту до 10%, при цьому міцність цементів, які містять гідроксид магнію, знижується.

Безусадочні розчини і бетони виготовляють також на водонепроникному безусадочному цементі (ВБЦ), який розробив В.В. Михайлов. Цей цемент отримують сумісним помелом глиноземистого цементу, напівводного гіпсу і вапна-пушонки. Вміст глиноземистого цементу складає не менше 85%, а співвідношення між гіпсом і вапном може змінюватися від 0,5 до 1. Початок тужавлення цементу починається не раніше 1 хв, кінець – не пізніше 10 хв. Лінійне розширення цементних призм, занурених у воду через добу, повинно бути не менше 0,01% і не більше 0,3%. Через годину від початку замішування зразки стають водонепроникними при тиску 0,3 МПа, а через 1 добу – 0,6 МПа. Розчини на основі ВБЦ застосовують для влаштування гідроізолюючих торкретних оболонок бетонних і залізобетонних підземних споруд, які фільтрують воду.

При гідросульфоалюмінатному розширенні, найбільш характерному для розширних цементів, збільшення об'єму цементного каменю є наслідком інтенсивного росту кристалів еtringіту у тверднучому цементному камені, коли останній вже набрав певну міцність, але зберіг ще достатню пластичність, щоб не руйнувалась його цілісність і утворювалися тріщини.

Поряд з цією гіпотезою розширення цементного каменю, яку сформулювали П.П. Будніков і І.В. Кравченко, є і ряд інших гіпотез (набухання колоїдного еtringіту, дія осмотичних сил та ін.).

Ступінь розширення цементного каменю залежить від міцності цементного каменю в період, коли розвиваються значні внутрішні напруження при кристалізації еtringіту. Чим вища міцність цементного каменю, тим меншим повинно бути розширення.

Один з перших розширних цементів був запропонований Лосьє в 1944 р. (*цемент Лосьє*). Спосіб його отримання полягає у сумісному помелі портландцементного клінкеру, гранульованого доменного шлаку і добавки, що обумовлює розширення. Останньою служить продукт випалу шихти, що

складається з 50% гіпсу, 25% карбонату кальцію і 25% бокситу. Цемент Лосьє містить близько 40% алюмінатів кальцію, 40% спеченого (нерозчинного) ангідриту і 20% двокальцієвого силікату γ -модифікації. При твердненні цементу в результаті хімічної взаємодії алюмінатів кальцію з ангідритом у присутності води утворюється високосульфатна форма гідросульфоалюмінату кальцію, в результаті кристалізації якого у певний період тверднення має місце розширення цементного каменю. Доменний шлак у складі цементу виконує функцію стабілізатора, який забезпечує поглинання надлишку ангідриту. При зміні відношення компонентів, що входять до цементу і тонкості їх помелу можна регулювати розширення і характер його зміни в часі. Цемент Лосьє характеризується розширенням зразків цементного каменю до 0,5% і тривалістю процесу розширення від 24 год до 30 діб. При повітряному зберіганні і недостатньому зволоженні розширення припиняється через 48 год.

При твердненні розширеного цементу Лосьє у воді енергія розширення досягає 5 МПа, при твердненні на повітрі вона зменшується до 3 МПа. Однією з переваг цього цементу є його підвищена водонепроникність. Для повного проходження процесу розширення розчини і бетони на основі цементу Лосьє необхідно зволожувати протягом перших 10...15 днів. Цемент Лосьє використовують при ремонті залізобетонних конструкцій, будівництві тунелів, для безшовних дорожніх покриттів, омоноличування стиків мостів, гребель і дамб.

Гідросульфоалюмінатне розширення портландцементу досягається введенням різних композицій добавок. В різний час з цією метою пропонувалось вводити в портландцемент сульфат алюмінію, гіпс та алунітову породу, глинисто-гіпсові породи, каолін, вапно та гіпс, метакаолін і гіпс та ін.

В 1942 р В.В.Михайлов запропонував слаборозширний цемент, який отримують змішуванням портландцементу (не менше 85%), меленого високоосновного гідроалюмінату кальцію і гіпсу (не більше 10%). Високоосновний гідроалюмінат кальцію ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 13\text{H}_2\text{O}$) синтезується при гідратації

глиноземистого цементу та вапна, взятих у співвідношенні 1:0,5 за масою.

Цемент Михайлова характеризується короткими строками тужавлення: початок – не раніше 15 хв і кінець – не пізніше 30 хв. Лінійне розширення цементу при твердненні на повітрі через 1 добу не менше 0,002%, 28 діб – 0,1%, у воді через 1 добу не менше 0,05%, 28 діб не більше 0,5%. Цемент застосовувався для омонолічування збірних і пошкоджених під час Другої Світової війни монолітних залізобетонних конструкцій, заповнення простору між станинами машин і фундаментами та виготовлення збірних залізобетонних конструкцій з підвищеною тріщиностійкістю.

І.В. Кравченко у 1954 р запропонувала розширний портландцемент (РПЦ), який має наступний склад, %: портландцемент – 60...65; глиноземистий цемент (або високоглиноземистий шлак) – 5...7; двоводний гіпс – 7...10, активна мінеральна добавка осадового походження – 20...25. Помел цементу виконується до дисперсності, що характеризується залишками на ситі №02 не більше 1% і №008 не більше 7%. Підвищення тонкості помелу РПЦ призводить до зростання його міцності, однак при цьому зменшується лінійне розширення.

Початок тужавлення РПЦ настає не раніше 30 хв, кінець – не пізніше 12 год від початку замішування. РПЦ має ті ж марки за міцністю, що і звичайний портландцемент.

Лінійне розширення зразків з тіста нормальної густоти РПЦ повинно складати:

- при комбінованому водно-повітряному твердненні через 1 добу – не менше 0,15%; 28 діб – не менше 0,1%;
- при водному твердненні через 1 добу – не менше 0,15%; 28 діб – не менше 0,3 і не більше 1%.

Для цього виду цементу характерне інтенсивне зростання міцності в процесі пропарювання при 70...80° С (рис.8.1) Воно дає можливість приблизно у 2 рази скоротити тривалість пропарювання залізобетонних конструкцій і виробів. При цьому бетон на основі РПЦ активно продовжує набирати міцність після пропарювання. Характерним для бетонів на РПЦ

є їх висока водонепроникність. Пропарені зразки з подальшим твердненням у воді 3 доби здатні витримувати гідростатичний тиск до 1,6 МПа.

Бетони на розширному цементі достатньо стійкі при температурі до 60...80°C, але їх не можна застосовувати в умовах, коли температура навколишнього середовища перевищує 90...110°C. При такій температурі відбувається інтенсивне розширення цементного каменю, яке викликає утворення тріщин.

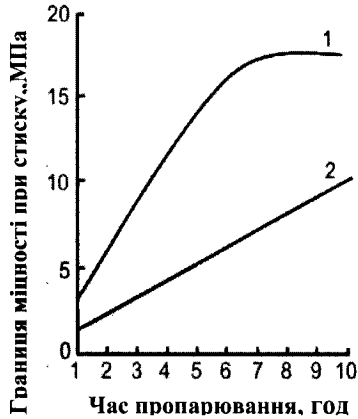


Рис. 10.1. Зміна міцності РПЦ (1) і портландцементу (2) при пропарюванні

Для бетонів на РПЦ поряд з високою водонепроникністю характерна і достатньо висока морозостійкість. Про це свідчать дані отримані І.В.Кравченко при випробуванні бетонів на морозостійкість зануренням зразків як у прісну воду, так і в сольовий розчин (табл.10.1).

Зчеплення бетонів на РПЦ зі старим бетоном в 2...3 рази більше, ніж у бетонів на звичайному цементі. Гідросульфоалюмінат кальцію, який викликає розширення цементного каменю, може утворюватися при введенні в портландцемент замість глиноземистого цементу інших матеріалів з підвищеним вмістом Al_2O_3 . Хороші результати

можна одержати при використанні добавки бокситу або алуніту. Бетони на цементях, які містять біля 10% таких гірських порід, інтенсивно набирають міцність, особливо в умовах тепловологісної обробки, мають високу водонепроникність і морозостійкість.

Таблиця 10.1

Морозостійкість бетону на розширному цементі

Умови випробувань	В/Ц	Міцність при стиску через 28 діб, МПа,	Коефіцієнт морозостійкості (%) через цикли				
			50	100	150	200	300
У прісній воді	0,45	33,6	154	135	131	128	86
У сольовому розчині (океанська вода трикратної концентрації)	0,45	33,6	121	103	-	91	-

О.П.Мчедлов-Петросян і В.І.Бабушкін розробили ряд розширних композицій на основі портландцементу з використанням принципу т.зв. *компенсованого розширення*. У якості компоненту, що забезпечує розширення, була взята добавка сульфату алюмінію, який у тверднучому цементі сприяє отриманню еtringіту. Для узгодженості у часі процесів структуроутворення з процесами кристалізації еtringіту були використані добавки нітрату кальцію та технічних лігносульфонатів (ЛСТ), а в якості компенсатора внутрішніх напружень – добавка алюмінієвого порошку.

Оптимальний склад розширного розчину складу 1:3 при В/Ц=0,4 у % за масою:

портландцемент М400 – 100;

нітрат кальцію – 3;

сульфат алюмінію – 2;

ЛСТ – 0,15;

алюмінієвий порошок – 0,15

Розчини на основі розроблених розширних композицій є антикорозійними і достатньо морозостійкими.

Для цементів з підвищеним вмістом трикальцієвого алюмінату добавку сульфату алюмінію можна замінити на напівводний гіпс. У цьому випадку розширення здійснюється як

за рахунок кристалізації еtringіту, так і двоводного гіпсу. Композиції знайшли застосування для гідроізоляції резервуарів, ремонтних робіт, при омоноличуванні армованих стиків у гідротехнічному будівництві, у будівництві та ремонті водопровідних і каналізаційних систем.

Ряд розширних цементів з різним ступенем і енергією розширення запропонований на основі глиноземистого цементу. У 1935...1941 рр. В.В.Михайловим був розроблений *водонепроникний розширний цемент (ВРЦ)*. Цей цемент отримують спільним помелом або ретельним змішуванням глиноземистого цементу, будівельного чи високоміцного гіпсу та високоосновного гідроалюмінату кальцію. Оптимальний склад ВРЦ: глиноземистий цемент – 70...76%, напівводний гіпс – 20...22%, високоосновний гідроалюмінат кальцію – 10...11%

Високоосновний гідроалюмінат має склад $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 13\text{H}_2\text{O}$. Його отримують шляхом автоклавної обробки при температурі 120...150° С суміші глиноземистого цементу з вапном-пушонкою складу 1:1 за масою, що замішана 30% води. Отриманий продукт висушують і подрібнюють. Для порівняно невеликих виробництв чотирикальцієвий гідроалюмінат можна виготовляти за спрощеною схемою – перемішуванням глиноземистого цементу і вапна в розчинозмішувачі з водою у кількості не менше 100% із наступним витриманням суміші протягом 3...5 діб, сушінням і помелом.

Розчини і бетони на цьому цементі не можна застосовувати в конструкціях, які експлуатуються при недостатній вологості або при температурі більше 80°С.

До основних недоліків ВРЦ відноситься також швидке тужавлення, що ускладнює виготовлення і вкладання бетонних і розчинових сумішей на його основі.

Недоліків ВРЦ позбавлений *гіпсоглиноземистий розширний цемент* – ГГРЦ – високоміцна швидкотверднуча гідравлічна в'язуча речовина, отримана при спільному помелі глиноземистого клінкеру з природним двоводним гіпсом. Вміст гіпсу в ГГРЦ рекомендується в межах 30%. При замішуванні цього цементу водою спочатку кристалізуються гідроалюмінати кальцію, які взаємодіють з гіпсом, утворюючи гідро-

сульфоалюмінат кальцію, що викликає розширення тверднучого цементного каменю. ГГРЦ був запропонований І.В. Кравченко і почав вироблятися у промисловому масштабі з 1951 р. Володіючи перевагами ВРЦ, цей цемент має більш тривалі строки тужавлення та меншу вартість.

Як і глиноземистий цемент ГГРЦ подрібнюють до залишку на ситі №008 не більш 10%. Початок тужавлення його не раніше 10 хв, кінець – не пізніше 4 год після замішування водою. Лінійне розширення ГГРЦ при комбінованому водно-повітряному твердненні через 1 добу становить не менше 0,15%, 3 доби – 0,10% , при зануренні у воду через 1 год. після закінчення тужавлення в однодобовому віці – не менше 0,15%, тридобовому – не менше 0,1% і не більше 0,6%. Через добу після виготовлення цементний розчин складу 1:2 (цемент:пісок) з В/Ц=0,3 стає водонепроникним при робочому тиску 1 МПа. Границя міцності ГГРЦ при стиску через 3 доби тверднення – не менше 28 МПа, що складає приблизно 60...70% міцності вихідного глиноземистого цементу.

Для бетонів на ГГРЦ справедлива загальна залежність міцності від водоцементного відношення. Приблизно таким самим, як у портландцементних, є зчеплення бетонів зі сталевією арматурою, однак при застосуванні ГГРЦ у залізобетонних конструкціях, які експлуатуються на повітрі, необхідно застосовувати спеціальні заходи для захисту арматури від корозії (введення інгібіторів, захисні обмазки та ін.). Для бетонів на ГГРЦ характерна досить висока атмосферо- і морозостійкість. Разом з тим, неприпустимо застосовувати цей цемент при температурах, які перевищують 90...100° С за причини інтенсивного водовиділення гідросульфоалюмінатом кальцію, що супроводжується руйнуванням каменю.

Бетони на ГГРЦ достатньо стійкі у морській воді і в 1%-них розчинах сульфатів натрію і магнію.

Склади на основі ГГРЦ показали високу ефективність при виготовленні водонепроникних конструкцій, монолітних збірних залізобетонних споруд, тампонуванні нафтових свердловин. Він ефективний у бетонах для захисту від радіоактивних випромінювань і послаблення потоку нейтронів,

що обумовлено відносно високим вмістом хімічно зв'язаної води в цементному камені: 30...32% хімічно зв'язаної води у порівнянні з 26...28% для глиноземистого цементу і 22...24% для портландцементу.

10.2. Напружуючі бетони

До напружуючих відносяться бетони, які інтенсивно розширюються при твердненні і можуть бути застосовані для виготовлення попередньо напружених (*самонапружених*) залізобетонних конструкцій. Такі конструкції виготовляють з важкого, у тому числі і дрібнозернистого бетону, а також легкого бетону з маркою за густиною не нижче D1400. Вони призначені для роботи у широкому діапазоні температур – не вище 50⁰ С і не нижче мінус 70⁰ С.

Самонапружені залізобетонні конструкції виготовляють із застосуванням *напружуючих цементів (НЦ)*. Напружуючими називають розширні цемента, для яких характерна велика хімічна енергія розширення. Вони здатні при затвердінні натягувати арматуру і обтискувати бетон без порушення щеплення між ними і зниження міцності.

На відміну від інших розширних бетонів напружуючі бетони здатні створювати тиск на перешкоди, що обмежують їх вільне розширення. Зусилля, яке розвивається цементним каменем, при обмеженні деформацій його вільного розширення називають *зусиллям самонапруження*.

У самонапруженому залізобетонному виробі розширення бетону обмежене арматурою. При вільному розширенні, яке може бути у декілька разів більше розширення, що обмежено арматурою в напружуючих бетонах відбуваються значні деструктивні процеси аж до їх руйнування.

Вперше ідея використання розширних цементів при виробництві попередньо напружених залізобетонних конструкцій була висловлена В.В.Михайловим. Була запропонована технологія напружуючого цементу (НЦ), яка полягає у сумісному помелі портландцементу, глиноземистого цементу та гіпсу з введенням при необхідності добавки вапна. Цементи з питомою поверхнею

3000...4500 $\text{см}^2/\text{г}$ при відношенні портландцементу, глиноземистого цементу і гіпсу в межах 70:16:14 - 64:20:16 з можливою добавкою вапна до 5% забезпечують розширення бетону, достатнє для натягування сталевї арматури при досягненні міцності бетоном близько 15 МПа.

Для отримання напружуючого цементу із самонапруженням 2 МПа після 28 діб необхідний тонкомелений портландцементний клінкер, який забезпечує активність у цьому віці не менше 40 МПа, а для НЦ із самонапруженням 3 МПа – не менше 50 МПа. Через 1 добу такий клінкер повинен забезпечувати міцність не менше 10 МПа, через 3 доби – 25 МПа. Для встановлення взаємозв'язку між міцністю при стиску ($R_{ст}$) портландцементної складовї НЦ і його самонапруженням (σ_c) запропоноване емпіричне рівняння:

$$\sigma_c = 1,26 \cdot 10^{-3} R_{ст}$$

Область рекомендованих складів цементного клінкеру і відповідні їм значення самонапруження наведені на трикутній діаграмі (Рис.10.2).

Залежність показника розширення і самонапруження НЦ від вмісту глиноземистого компоненту має екстремальний характер. (Рис.10.3). Розширення цементного каменю різко зменшується при збільшенні співвідношення $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SO}_3$ (Рис.10.4). Залежно від показника самонапруження, одержують НЦ з енергією самонапруження – не менше 1 МПа (НЦ-10), - 2 МПа (НЦ-20) і 4 МПа (НЦ-40). Початок тужавлення НЦ повинен наступати не раніше 30 хв, кінець – не пізніше 4 год після замішування. Для сповільнення тужавлення застосовують добавки ЛСТ, виннокам'яної, лимонної кислот та ін., а також попередню часткову гідратацію в'язучих шляхом поверхневого зволоження частиною води замішування і витримуванням не менше 3 хв.

Границя міцності для цементів НЦ-20 і НЦ-40 при стиску через 1 добу не менше 15 , через 28 діб – 50 МПа, при згині через 28 діб – 6 МПа. Міцність напружуючих цементів і бетонів інтенсивно зростає не тільки в період до 28 діб, але і в наступні строки. Вільне лінійне розширення через 28 діб повинно бути для НЦ-20 не більше 2% і для НЦ-40 не більше

2,5%. Вміст сірчаного ангідриду нормується в кількості не менше 3,5% і не більше 7%.

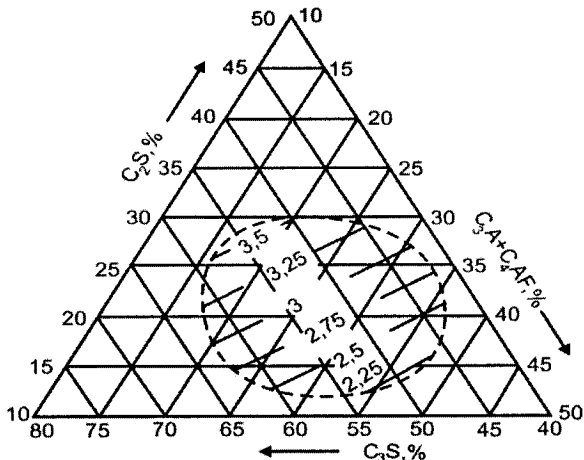


Рис. 10.2. Самонапруження у МПа напружуючих цементів з промислових клінкерів у 28-добовому віці залежно від мінералогічного складу клінкеру

Для напружуючих бетонів встановлені наступні класи за міцністю при стиску: В20; В25; В30; В35; В40; В45; В50; В55; В60; В70. Класи за міцністю на осьовий розтяг: В_т1.6; В_т2; В_т2.4; В_т3.2; В_т3.6; В_т4; В_т4.4; В_т4.8. Марки за морозостійкістю F100; F150; F200; F300; F400; F500.

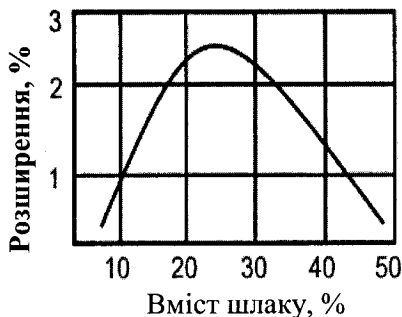


Рис.10.3. Залежність розширення напружуючого цементу від вмісту глиноземистого шлаку

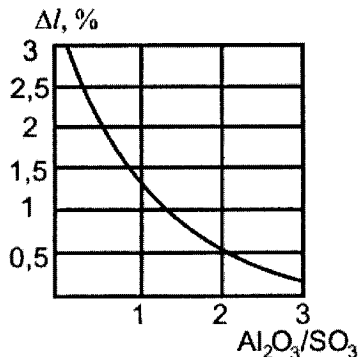


Рис.10.4. Зміна розширення цементного каменю (Δl) залежно від відношення Al_2O_3/SO_3

Марки бетонів за самонапруженням відповідають середньому значенню попереднього напруження в МПа, яке розвивається при твердненні бетону в результаті розширення при коефіцієнті повздовжнього армування $\mu=0,01$. Нормують марки бетону за самонапруженням: $S_{p0,6}$; $S_{p0,8}$; S_{p1} ; $S_{p1,2}$; $S_{p1,5}$; S_{p2} ; $S_{p2,5}$; S_{p3} ; S_{p4} . Проектні марки бетону за самонапруженням вище S_{p2} і S_{p4} передбачаються при використанні відповідно цементів НЦ-20 і НЦ-40. Вони призначаються для конструкцій, які експлуатуються у вологих умовах або у воді.

Марка за водонепроникністю для важкого і дрібнозернистого напружуючого бетону забезпечується не нижче W12.

Поряд з напружуючими цементами, які одержують із суміші портландцементу і глиноземистого цементу з гіпсом (і вапном при виготовленні чотирьохкомпонентних в'язучих) є позитивний досвід отримання *напружуючих цементів з сульфоалюмінатного клінкеру* Клінкер, що містить сульфоалюмінат кальцію – САК, можна отримати з вапняку або крейди, гіпсу і бокситу. Як глиноземовмісні компоненти можуть бути використані також шлаки вторинної переплавки алюмінію, каоліни, алуніти і золи. Замість природного гіпсу можуть бути використані гіпсовмісні відходи промисловості – фосфогіпс, фторгіпс та ін. У сировинних матеріалах допускається обмежений вміст SiO_2 і Fe_2O_3 , оскільки ці оксиди перешкоджають утворенню САК, зв'язуючи CaO і Al_2O_3 у гідравлічно малоактивні сполуки. Луги та інші домішкові оксиди у сировинних компонентах для сульфоалюмінатного клінкеру нормуються у тих же межах, що і при отриманні портландцементного клінкеру.

Основними хімічними сполуками, які входять до складу сульфоалюмінатного клінкеру є $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaSO}_4$, $12\text{CaO}\cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$, $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ і CaSO_4 .

Як показали досліди Т.В. Кузнєцової, зі збільшенням у клінкері вмісту сульфоалюмінату кальцію (САК) від 10 до 50% міцність цементного каменю підвищується у 6 разів – від 10 до 62 МПа. Для отримання цементу марки 500 необхідний клінкер із вмістом САК не менше 40%. Найбільший вміст САК дося-

гається випалом сировинної суміші при температурі 1350° С. При цьому, з огляду на те, що при такій температурі спостерігається і значне розкладання CaSO_4 , у сировинній суміші забезпечують певний надлишок гіпсу.

Підбираючи необхідне співвідношення в клінкері між сульфоалюмінатом і силікатами або алюмінатами кальцію, можна отримати особливо швидкотверднучі, високоміцні, безусадочні, розширні та напружуючі цементи.

Залежно від кількості САК у клінкері та вмісту гіпсу в цементі, змінюється лінійне розширення цементів і показник самонапруження. При зміні вмісту сульфоалюмінатної фази в клінкері від 20 до 50% лінійне розширення цементу зменшується від 0,44 до 0,22% у дводобовому віці, а самонапруження зростає від 1,9 до 5 МПа. Зі збільшенням тривалості тверднення зростає при підвищеному вмісту САК як лінійне розширення, так і самонапруження.

Виділення теплоти при твердненні цементів починається через 1 год і досягає максимуму через 2 год від моменту замішування. На першу добу сульфоалюмінатним цементом виділяється 80% загальної теплоти, глиноземистим – біля 70%, портландцементом – 20% (рис.10.5). Високе тепловиділення

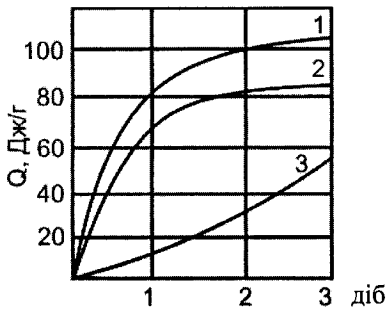


Рис. 10.5. Тепловиділення цементів:

- 1 – сульфоалюмінатного;
- 2 – глиноземистого;
- 3 – портландцементу

дозволяє сульфоалюмінатному цементу інтенсивно набирати міцність при знижених температурах.

Відомий позитивний результат застосування сульфоалюмінатного клінкеру для отримання напружуючих цементів при будівництві спортивних споруд (Велика спортивна арена і плавальний басейн у Лужниках, Велика спортивна арена «Динамо» та ін.). Цемент успішно використовувався також для зведення гідротехнічних

споруд при замонолічуванні швів, влаштуванні бетонної футеровки обертових печей, у домобудівництві.

Енергія розширення НЦ дає можливість забезпечити дво- і трьохосьове натягування арматури, яке важко здійснити механічним шляхом.

Застосування напружуючих бетонів дозволяє суттєво підвищити тріщиностійкість конструкцій за рахунок усунення усадочних тріщин. Вони забезпечують водо-, бензо- і газонепроникність, що особливо важливо для підземних і підводних напірних споруд. Напружуючі бетони ефективні при виготовленні резервуарів, труб, технологічних ємностей, в дорожніх, аеродромних та інших покриттях, просторових конструкціях и т.п.

Бетони на напружуючих цементах застосовуються також для підсилення залізобетонних конструкцій під навантаженням, зведення монолітних самонапружуючих підлог та покрівель.

11. ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ БЕТОНИ

Електротехнічні бетони – це спеціальні бетони з заданими електричними властивостями. Такі бетони можуть бути використані для отримання виробів різноманітних розмірів і форми, здатних сприймати механічні й електричні навантаження. Електротехнічні бетони розділяють на дві групи – електроізоляційні та електропровідні.

11.1. Електроізоляційні бетони

Електроізоляційні бетони мають високий питомий електричний опір, з малим значенням діелектричних втрат, високою діелектричною проникністю, електричною міцністю. Вони застосовуються для виготовлення струмообмежуючих реакторів, траверс ліній електропередачі та інших високовольтних ізолюючих конструкцій.

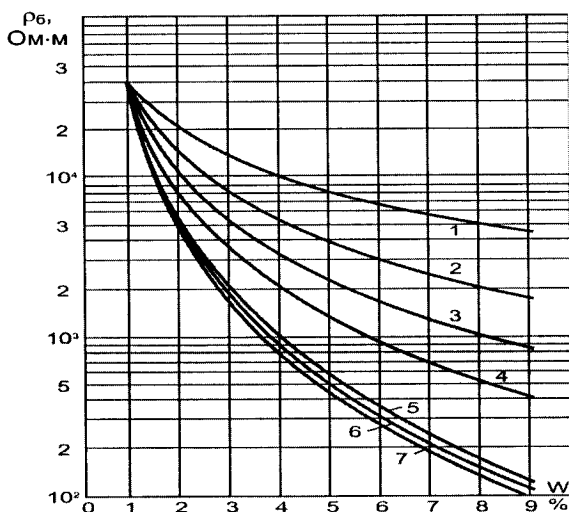


Рис.11.1. Залежність питомого опору бетону з міцністю при стиску 20 МПа від температури і вологості:
1 – -10⁰С; 2 – -7⁰С; 3 – -5⁰С; 4 – -3⁰С; 5 – 0⁰С; 6 – +5⁰С;
7 – +10⁰С

11. Електротехнічні бетони

Звичайний цементний бетон у заданих температурно-вологісних умовах характеризується певним *електроопором*. Однак електричний опір бетону досить нестабільний, при сезонних коливаннях температури і вологості він змінюється на 6...8 порядків. Якщо опір сухого бетону складає $10^9 \dots 10^{11}$ Ом·м, то при його зволоженні він досягає всього $10 \dots 10^2$ Ом·м (рис.11.1).

Клінкерні мінерали можна віднести до хімічних сполук з іонними зв'язками. Їх електроопір значною мірою залежить від особливостей будови кристалічної ґратки. Значення *питомого електричного опору* мінералів (Ом·м) портландцементного клінкеру наведені нижче:

$\beta\text{-C}_2\text{S}$	C_3S	C_3A	C_4AF
$1,5 \cdot 10^7$	$1,2 \cdot 10^6$	$6,0 \cdot 10^5$	$6,4 \cdot 10^5$

Питомий електричний опір продуктів тверднення цементного каменю росте зі збільшенням ступеню їх закристалізованості. Стосовно до гідросилікатів найбільший питомий опір мають продукти, основність яких наближається до одиниці (рис.11.2).

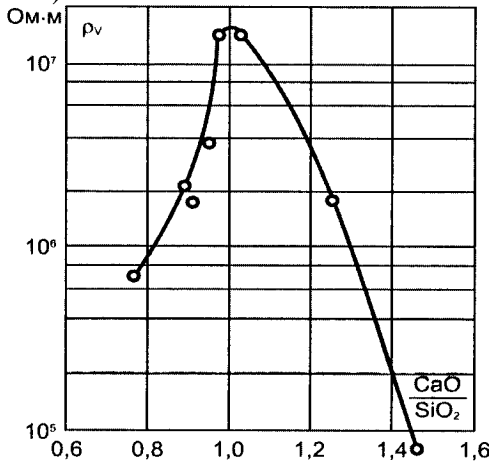


Рис.11.2. Залежність питомого електричного опору гідросилікатів кальцію від їх основності

Мінімальний опір мають високоосновні гідросилікати і гідросульфоалюмінати кальцію. Електричний опір гідратних

новоутворень цементного каменю знаходиться в межах від 10^4 до 10^7 Ом·м. Порівняно з гідроалюмінатами та гідросульфоалюмінатами гідросилікати мають більш високі значення електричної міцності.

Електричні властивості заповнювачів на основі гірських порід залежать від їх мінералогічного складу, структури та вологості. Питомий опір основних породоутворюючих мінералів – більше 10^{11} Ом·м. Діелектрична проникність у них перевищує 10.

З мінералів, які входять до складу заповнювачів, питомий електричний опір збільшується для ряду кварц–польовий шпат–кальцит–слюда. Значення питомого електричного опору і відносної діелектричної проникності деяких розповсюджених гірських порід в сухому стані наведені в табл.11.1.

Таблиця 11.1

Діелектричні властивості гірських порід

Гірська порода	Електричний опір, Ом·м	Діелектрична проникність
Граніт	$3 \cdot 10^{13}$	4,5...5,4
Кварцит	вище 10^{10}	4,4...4,9
Діабаз	$2,2 \cdot 10^9$	9,0...13,0
Базальт	$1,3 \cdot 10^7$	10,3...15,6
Мармур	$2,5 \cdot 10^8$	8,2...9,0
Вапняк	$1,2 \cdot 10^7$	7,3...12,0
Піщаник	$6,4 \cdot 10^{10}$	4,0...4,7

На електропровідність гірських порід, як і цементного каменю, суттєвий вплив має вологість. Питомий опір бетону (ρ_b) у загальному вигляді характеризується залежністю:

$$\rho_b = \frac{A}{W^{n+1}}, \quad (11.1)$$

де A – питомий опір бетону при вологості 1%; W – вологість бетону; n – показник ступеня, який відображає швидкість зниження опору з ростом вологості (W) і зв'язаний зі збільшенням числа більш рухливих іонів.

Зі зниженням температури спочатку повільно, а потім при переході в область від'ємних температур більш інтенсивно, коефіцієнт A зростає.

Волога у порах бетону являється електролітом, який містить іони розчинних продуктів гідратації цементу та іони зовнішнього середовища. Питомий опір вологи у порах бетону (ρ_v) в загальному вигляді характеризується залежністю:

$$\rho_v = \frac{k}{W^n}, \quad (11.2)$$

де n – показник ступеня, який враховує температуру; k – коефіцієнт, на величину якого впливають характеристики порового простору.

На здатність бетону до зволоження суттєвий вплив має його В/Ц, зі збільшенням якого зростає пористість і вологовміст. На діелектричні характеристики бетону великий вплив має також вміст у ньому цементного каменю. З підвищенням витрати цементу і, відповідно, об'ємної концентрації цементного каменя електроопір бетону знижується. Оптимальною є витрата цементу, при якій коефіцієнт розсуву зерен щебеню наближається до одиниці.

Таблиця 11.2

Вплив концентрації заповнювача на пробивну напругу цементно-піщаних розчинів

Склад розчину	В/Ц	Концентрація заповнювача	Пробивна напруга, КВ	
			імпульсна $\tau=10^{-6}$ с	перемінна 50 Гц
1:0	0,25	0	115	39
3:1	0,27	0,171	86	26
1:1	0,30	0,338	65	23
1:2	0,35	0,530	58	22
1:3	0,50	0,580	46	17

Примітка: заповнювач – кварцовий пісок крупністю 0,6...0,8мм

Важливою електротехнічною характеристикою бетону є його *електрична міцність*, що характеризується значеннями пробивної напруги. Усі фактори, що сприяють збільшенню механічної міцності, сприятливо впливають і на його електричну міцність. З введенням у цементний камінь заповнювачів електрична міцність падає (табл.11.2). Найбільш слабким елементом структури бетону, по якому відбувається "пробій" є контактна зона. Мінімальні значення електричної

міцності властиві бетонам із застосуванням крупного заповнювача. При цьому зі збільшенням пористості останнього електрична міцність бетону знижується.

Граничні значення електричних характеристик, у межах яких можна керувати властивостями електроізоляційних бетонів, знаходяться в діапазоні:

Електрична міцність у шарі 1 см, кВ/см	
імпульсна ($\tau=1 \cdot 10^{-6}$ с)	60...140
при змінному струмі	20...60
Середня розрядна напруга на довжині 1 м, біля 3,0 кВ/см	
Питомий електричний опір при $t=20^{\circ}\text{C}$	
об'ємний, Ом·м	$10^9 \dots 10^{11}$
поверхневий, Ом·м	$10^{11} \dots 10^{14}$
Тангенс кута діелектричних втрат	0,05...0,20
Діелектрична проникність	6...10

Максимальні значення електричної міцності характерні для дрібнозернистих бетонів, які отримані із застосуванням високотемпературних режимів гідротермального тверднення.

До зниження електричного опору та інших діелектричних характеристик призводить розвиток у бетоні корозійних процесів. При проходженні струму в залізобетонних конструкціях мають місце процеси електрокорозії арматури і бетон руйнується під тиском продуктів корозії.

На електричні властивості бетону впливають механічні навантаження (рис.11.3), що викликають появу мікротріщин і полегшують зволоження матеріалу. У загальному вигляді зміна в часі електричного опору бетону, що працює під впливом механічних навантажень, описується виразом:

$$\rho_6 = \rho_0 \tau^{-m}, \quad (11.3)$$

де ρ_0 – питомий електричний опір бетону у вихідному стані; τ – час; m – показник, що залежить від характеру навантажень і умов середовища.

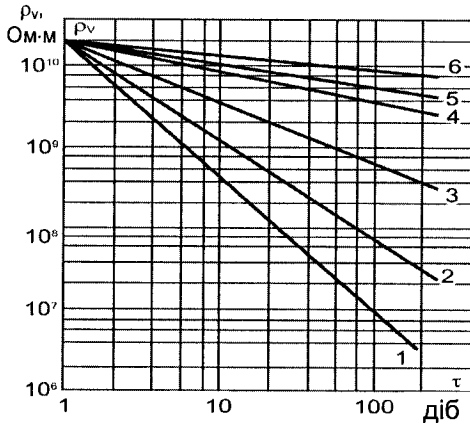


Рис.11.3. Залежність питомого об'ємного опору бетону від часу витримки при різному стискаючому навантаженні:
 1 – руйнівне навантаження ($\sigma_{руйн.}$); 2 – $0,9\sigma_{руйн.}$; 3 – $0,75\sigma_{руйн.}$;
 4 – $0,6\sigma_{руйн.}$; 5 – $0,45\sigma_{руйн.}$; 6 – без навантаження

Найбільш поширеним способом покращення діелектричних характеристик бетону являється підвищення його щільності. В цьому плані для електроізоляційного бетону важливий правильний підбір складу, який забезпечує його мінімальну пористість: зниження В/Ц і зменшення витрати цементу, підбір оптимального зернового складу заповнювачів, створення необхідних умов тверднення бетону. Для максимального зниження В/Ц перспективним є застосування добавок суперпластифікаторів, пластифікованих цементів, в'язучих низької водопотреби.

Зниження електропровідності бетону досягається введенням гідрофобізуючих та полімерних добавок. Як гідрофобізуючі добавки для отримання електроізоляційного бетону використовують бітуми, парафіни, кремнійорганічні олігомери. Вони вводяться в бетонну суміш у вигляді водних емульсій і суспензій. Електричний опір бетонів з цими добавками зростає на 1...3 порядки.

Відомий спосіб отримання електроізоляційного бетону, який запропонував Е.Ламберт. Суть його полягає у тому, що

бетон з добавкою бітумної емульсії (до 250 кг/м^3) піддається термічній обробці за температури $140\text{...}150^\circ \text{C}$, під час якої видаляється вільна вода, і бітум, розплавляючись, закупорює пори і надає бетону гідрофобні властивості. Додатково бетон покривають лаком. *Бетон Ламберта* має опір в середньому 10^{10} Ом·м. Недоліком такого способу є суттєве зниження міцності бетону.

Найбільш сприятливо на механічні властивості бетону при одночасному покращенні їх діелектричних властивостей впливають полімерні добавки.

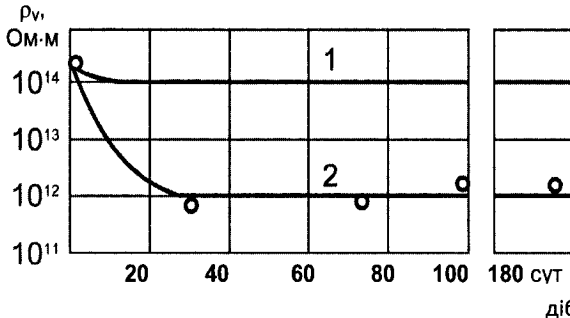


Рис.11.4. Зміна питомого об'ємного електричного опору піщаного бетону, просоченого петролатумом: 1 – повітряно-сухе середовище; 2 – середовище з підвищеною вологістю і температурою

Найбільш надійна стабілізація електроізолюючих властивостей бетону забезпечується об'ємним просоченням його у висушеному стані гідроізоляційними матеріалами. Широко використовується з цією метою петролатум. Технологія просочення бетону петролатумом порівняно проста і може здійснюватися як у спеціальних камерах під тиском, так і в звичайних просочувальних ваннах. Об'ємний електричний опір бетону (ρ_v), просоченого петролатумом, стабілізується на рівні $10^{12}\text{...}10^{14}$ Ом·м (рис.11.4).

Вплив просочування петролатумом на властивості електроізоляційного бетону показано за даними Ю.М. Баженова в табл.11.3.

Властивості електроізоляційного бетону,
просоченого петролатумом

Показники	Бетон складу 1:2 на річковому піску, В/Ц=0,4	
	до просочування	після просочування
Пробивна напруга, кВ	91	114
Питомий об'ємний електричний опір, Ом·м	$2,7 \cdot 10^{11}$	$>10^{14}$
Тангенс кута діелектричних втрат при 50 Гц	0,219	0,077
Діелектрична проникність при 50 Гц	8,7	7,5
Границя міцності, МПа		
при стиску	62	69
при осьовому розтягу	2,4	3,9

Для покращення і стабілізації електроізолюючих властивостей цементних бетонів ефективним є просочування висушеного бетону такими мономерами як стирол і метилметакрилат з наступною їх полімеризацією термokatалітичним або радіаційним способом.

Електричні характеристики бетону визначаються значною мірою режимом сушки. З ростом температури сушки збільшується питомий об'ємний опір бетону, знижуються значення тангенсу кута діелектричних втрат.

Стабілізація діелектричних властивостей бетону досягається поряд з об'ємним просочуванням гідроізоляцією за допомогою поверхневих покриттів. Найбільше розповсюдження отримали покриття на основі бітумних і дьогтьових матеріалів. Їх застосовують у вигляді паст, гарячих і холодних мастик, армованих гідроізоляційних матеріалів. Найбільш міцні і водостійкі покриття отримують на основі епоксидних смол, які можуть суміщатися з фенольними смолами, стиролом, бітумами і пеком.

Враховуючи можливість пошкодження, поверхнева гідроізоляція конструкцій з електроізоляційного бетону менш надійна, ніж об'ємне просочування.

Для армування конструкцій з електроізоляційного бетону ефективне застосування скляної і склопластикової арматури. Остання складається з пучка скляних волокон, омонолічених полімерним зв'язуючим.

Штучний камінь з полімерцементною матрицею та об'ємним вмістом скловолокон 10% володіє питомим опором біля 10^{10} Ом·м і характеризується пробивною напругою до 6...8 кВ/мм.

Міцність на розтяг і згин армованого склом розчину перевищує міцність неармованого розчину в 2...3 рази навіть після 10 років повітряного зберігання. Максимальна деформація від граничного розтягуючого зусилля у склоармованого розчину в 10 разів більше, ніж для неармованого.

Електроізоляційні бетони отримують з застосуванням як гідравлічних цементів (портландцементу і його різновидів, глиноземистого цементу), так і повітряних в'язучих (гіпсу, каустичного магнезиту). Армуючими матеріалами служать троси і джгути, скручені з тонких скляних ниток, сітки з безлужного скловолокна. Застосовують також волокно, яке отримане витягуванням з базальтового розплаву.

У композиціях на основі мінеральних в'язучих, які армовані скляною арматурою, вдало поєднуються властивості вихідних компонентів і досягаються поряд з високими електроізоляційними властивостями, висока міцність і довговічність. Питома міцність склоцементу в 1,5 рази вища питомої міцності сталі А-І, а густина нижче густини алюмінієвих сплавів у 1,5...2 рази. Відносні деформації склоцементу в момент утворення мікротріщин у матриці в 30...60 разів вищі, ніж у залізобетоні.

Для захисту скловолокнистої арматури запропоновано обробляти її лугостійкими складами органічних олігомерів, які здатні полімеризуватися в єдиному технологічному процесі при твердненні в'язучого. Позитивний ефект характерний при використанні також захисних кремнійорганічних покриттів скловолокна.

11.2. Електропровідні бетони

Електропровідний бетон (*бетел*) розроблений на початку 60-х років минулого століття в результаті робіт, виконаних під керівництвом Ю.М.Вершиніна. Цей вид бетону відрізняється за

складом від звичайного наявністю дисперсного провідникового компоненту, що повинен мати необхідну електропровідність, температуростійкість, здатність протистояти окислюючим процесам при виготовленні і нагріванні. Він не повинен також вступати з цементом у хімічні реакції, які могли б призвести до нестабільності електропровідності бетону.

Для прогнозування електропровідності бетонів (σ) як композиційних матеріалів можна використовувати формулу:

$$\sigma = \sigma_0 \left(1 + \frac{\delta_1}{\frac{1 - \delta_1}{3} + \frac{\sigma_0}{\sigma_1 + \sigma_0}} \right), \quad (11.4)$$

де σ_0 – електропровідність матричної фази; σ_1 і δ_1 – відповідно електропровідність та об'ємна частка дисперсної фази.

Електропровідними компонентами бетону можуть бути порошки графіту, сажі, коксу та інших вуглецевих речовин, а також деякі порошкоподібні метали та їх оксиди.

З вуглецевих речовин для отримання бетела ефективним є використання електродного коксу з тонкістю помелу за питомою поверхнею 6...10 тис. см²/г. За останні роки показана можливість введення як наповнювача електропровідних бетонів шунгизиту – подрібненої вуглецевої гірської породи. Зі збільшенням концентрації вуглецевої добавки збільшується електропровідність бетону і зменшується його міцність (рис. 11.5). Мінімальна концентрація добавки вибирається такою, щоб у цементному камені сформувалась безперервна струмопровідна фаза, а максимальна – обмежується необхідною міцністю бетону. Оптимальна концентрація залежить від тонкості помелу добавки і може коливатися в межах 20...40% від маси композиційного в'язучого.

Зі збільшенням коефіцієнта надлишку композиційного в'язучого у бетоні по відношенню до пустотності заповнювача і при незмінній об'ємній концентрації добавки електричний опір бетону зменшується.

Основним недоліком бетону з вуглецевою добавкою, що не дозволяє використовувати його при тривалій дії електричного

струму, є вигорання добавки, що призводить до накопичення дефектів в електропровідній фазі і дегідратації гідратних новоутворень. Вказаного недоліку не мають бетони з металічними наповнювачами.

R_b , МПа ρ , Ом·м

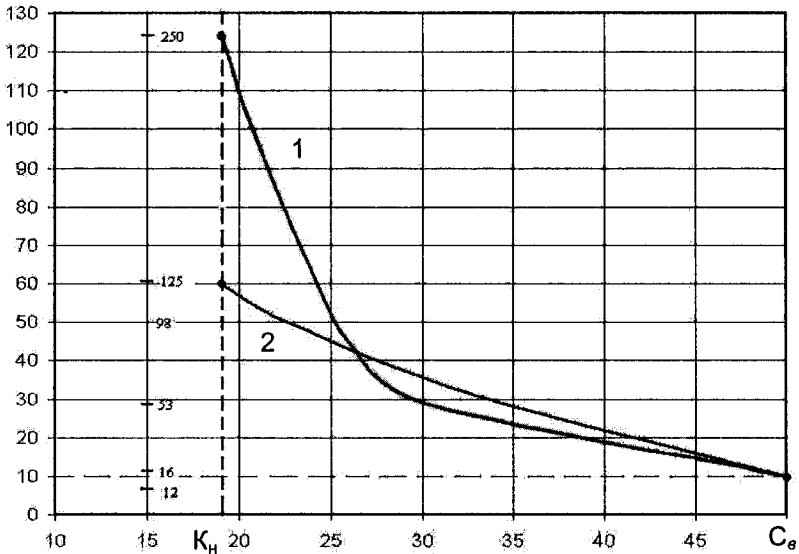


Рис. 11.5. Залежність міцності при стиску (1) і електроопору (2) бетону від об'ємної концентрації вуглецю (C_v) в композиційному в'язучому; K_n – мінімальна концентрація вуглецю, при якій забезпечується безперервність струмопровідної фази

Металічні порошки можуть бути отримані різними способами, в тому числі і на основі деяких відходів промисловості, наприклад, шліфувальних шламів виробництва підшипників та ін. Металічні порошки, знижуючи електроопір бетону, менш негативно впливають на його міцність, а у певному діапазоні концентрацій можуть призвести до його зміцнення.

Електропровідні бетони можуть бути отримані на цементних, полімерних і полімерцементних в'язучих, в'язучих

контактного тверднення та ін. Застосування портландцементу та в'язучих на його основі дозволяє отримати вироби з високими фізико-механічними і техніко-економічними показниками, які мають достатньо високі експлуатаційні показники (табл.11.4).

Таблиця 11.4

Технічні властивості електропровідного цементного бетону

Показники	Значення
Питомий електричний опір, Ом·см	10...10 ⁴
Міцність, МПа	
на стиск	10...50
на розтяг	2...10
Середня густина, кг/м ³	1800...2200
Допустима густина струму, А/см ²	10...0,1
Робочий діапазон температури, °С	-60...150
Робоча температура перегріву, °С	120
Допустима швидкість перегріву, °С/сек	200
Питома руйнівна енергія при однократному включенні навантаження струму, Вт·сек/см ³	230...300
Питомий об'єм, необхідний для розсіювання енергії 1 МВт·сек при нагріванні на 1 ⁰ С	0,57

Бетел може застосовуватися як для електротехнічних конструкцій загального призначення (гріючих панелей, підлог, дорожніх плит та ін.), так і виробів спеціального призначення (резистори, заземлювачі та ін.). З метою підвищення щільності виробів у бетонні суміші можна вводити добавки суперпластифікаторів, застосовувати в'язучі низької водопотреби. Можна також застосовувати жорсткі бетонні суміші і силові методи ущільнення (пресування, вібропресування та ін.). Для підвищення щільності виробів, покращення фізико-механічних і електричних властивостей виробів їх піддають сушінню і просочуванню мономерами з наступною полімеризацією.

За останні роки на основі металонасиченого електропровідного бетону (*бетел-м*) розроблені матеріали для захисту від іонізуючих і електромагнітних випромінювань, екрани та радіопоглинаючі матеріали.

12. РАДІАЦІЙНО-ЗАХИСНІ БЕТОНИ

До радіаційно-захисних відносяться спеціальні бетони для захисту від дії радіаційних (іонізуючих) випромінювань. Необхідність біологічного захисту від радіаційних випромінювань є на атомних станціях та інших підприємствах, де працюють ядерні реактори, прискорювачі елементарних частинок, установки по виробництву ізотопів, ядерного палива та ін. Найбільшу проникаючу здатність з усіх видів радіаційних випромінювань мають нейтрони та гамма-промені. Загальна схема захисту ядерного реактора, який є сильним джерелом цих видів випромінювань показана на рис. 12.1, а схема захисту реактора РБМК (реактор великої потужності каналний) на рис.12.2.

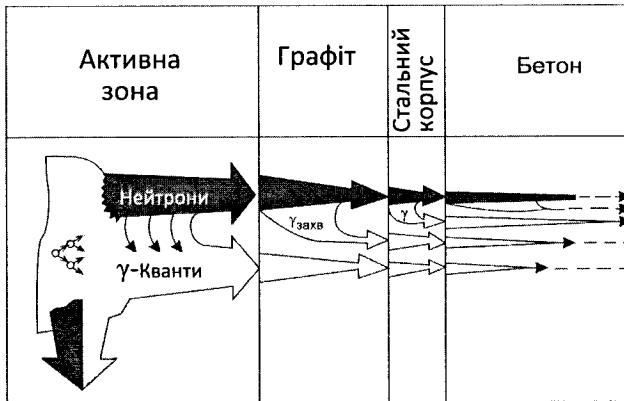


Рис.12.1. Схема захисту реактора
(за А.М. Комаровським)

Для радіаційного захисту застосовують важкі і особливо важкі бетони. Останні мають більш високу густину, дозволяють зменшити товщину захисних екранів. Однак їхнє виготовлення і застосування потребує більших витрат і пов'язане з рядом технологічних труднощів.

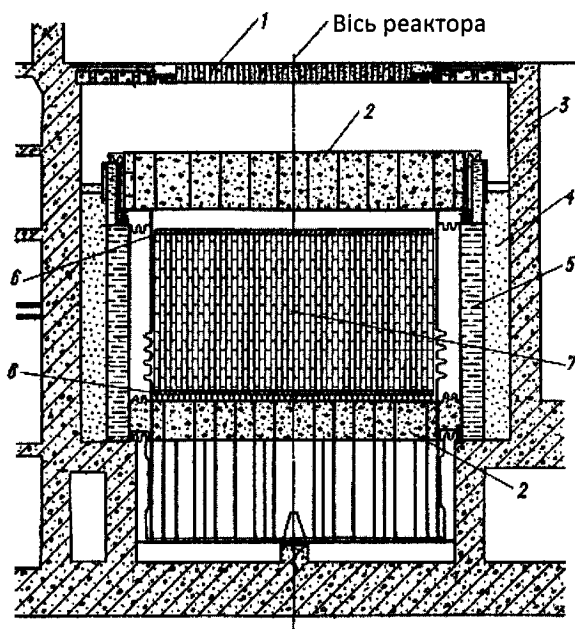


Рис.12.2. Захист енергетичного реактора РБМК;

1 - щільний настил (особливо важкий бетон, 4 т/м^3); 2 - засипка серпентиніту ($1,7 \text{ т/м}^3$); 3 - звичайний бетон ($2,2 \text{ т/м}^3$); 4 - пісок ($1,3 \text{ т/м}^3$); 5 - бак водяного захисту; 6 - сталеві захисні блоки; 7 - графітова кладка

12.1. Радіаційна стійкість бетону

Радіаційна стійкість матеріалів характеризує їх здатність зберігати свої властивості під впливом радіаційних випромінювань. Зміна властивостей обумовлена виникненням т.зв. радіаційних дефектів у результаті зсуву атомів в кристалічних решітках, ядерних реакцій, розривів хімічних зв'язків та ін. Найбільший вплив чинять нейтронне і гамма-випромінювання. Нейтрони та гамма-кванти мають більш високу

проникаючу здатність у порівнянні із зарядженими частинками – електронами, протонами, позитронами та ін. і викликають об'ємне пошкодження матеріалу. Радіаційна стійкість неорганічних речовин залежить від їх структури і типу хімічного зв'язку. Найбільш стійкими є іонні кристали, а також щільні структури з високою симетрією. Силікати починають змінювати властивості після опромінення нейтронами, коли їх *флюенс* – тобто величина, що дорівнює відношенню числа нейтронів, що падають за даний проміжок часу на деяку поверхню, розташовану перпендикулярно до напрямку поширення випромінювання, до площі цієї поверхні – дорівнює приблизно 10^{23} см^{-2} . У результаті опромінення відбувається анізотропне розширення кристалів, аморфізація їх структури, зменшення щільності, пружності, теплопровідності та ін. Істотні зміни у властивостях звичайних важких бетонів відсутні при опромінюваннях нейтронними потоками з флюенсом до $3 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-2}$.

Нижче для порівняння наведені мінімальні рівні значень флюенсу нейтронів, що викликають помітні (20...30%) зміни деяких неорганічних матеріалів:

матеріали	флюенс нейтронів, м^{-2}
бетон	$10^{24} \dots 5 \cdot 10^{24}$
скло	$5 \cdot 10^{21}$
кераміка	$10^{24} \dots 3 \cdot 10^{24}$
залізо	$2 \cdot 10^{22} \dots 3 \cdot 10^{23}$
сталь конструкційна	10^{23}

При визначенні радіаційної стійкості матеріалів для характеристики іонізуючого опромінення поряд з флюенсом нейтронів враховуються щільність потоку частинок, інтенсивність випромінювання, поглинена доза випромінювання. *Щільність потоку частинок* або квантів характеризується відношенням числа часток, що проникають в сферу елементарного об'єму за одиницю часу, до площі проекції сфери (квант в с на кв. метр – $\text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$). На відміну від щільності *інтенсивність випромінювання* – питома величина енергії ($\text{Вт}/\text{м}^2$). Поглинена *доза випромінювання* дорівнює відношенню

поглиненої енергії до маси середовища, що опромінюється (Дж/кг). Наприклад, щільність потоку нейтронів, що випромінюються ядерним реактором, досягає $5 \cdot 10^{17} \text{с}^{-1} \text{м}^{-2}$, ізотопним джерелом – $10 \dots 10^8 \text{с}^{-1} \text{м}^{-2}$. Інтенсивність випромінювання становить відповідно 10^4 і 10^{-6}Вт/м^2 . Доза випромінювання, поглинена бетоном конструкцій, розташованих за корпусом ядерного реактора за 30 років його служби складає $10^{11} \dots 10^{12}$ Дж/кг.

Щільність потоку нейтронів в активній зоні реакторів на теплових нейтронах досягає $10^{17} \dots 10^{18}$ нейтр·м⁻²·с⁻¹, а на швидких нейтронах – 10^{20} нейтр·м⁻²·с⁻¹. У результаті ослаблення в матеріалах активної зони потік нейтронів за корпусом реактора зазвичай на два-три порядки нижче, ніж в активній зоні.

Радіаційна стійкість істотно залежить від виду радіації, величини і потужності поглиненої дози, режиму опромінювання, умов експлуатації матеріалу в конструкціях.

Вплив радіаційного випромінювання на матеріали супроводжується іонізацією, що сприяє проходженню радіаційно-хімічних реакцій, у результаті яких виникають хімічно активні вільні радикали, атоми і молекули. При проходженні випромінювань через воду в результаті радіолізу утворюються вільні радикали Н та ОН, що взаємодіють між собою з утворенням таких продуктів як Н₂, Н₂О₂, НО₂ та Н₂О. Опромінення бетону призводить до радіолізу як вільної води, що заповнює капілярно-пористий простір цементного каменю, так і адсорбційної та хімічно зв'язаної води в складі гідратних продуктів твердіння. В результаті утворюються газоподібні продукти, обсяг яких може перевищувати 1000 см³ на 1 кг цементного каменю.

Радіаційно-хімічні реакції викликають нагрів цементного каменю до температури 300...350° С і зневоднення, що сприяють його усадці та розвитку деформацій. Опромінення цементного каменю може призводити до втрати понад 60% води, що знаходиться в ньому в різних формах, і це викликає істотне зниження міцності. При радіаційному опромінненні

цементного каменю інтегральним потоком нейтронів з флюенсом $5 \dots 10 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-2}$ усадка цементного каменю перевищує 2%, а міцність при стиску в пізньому віці знижується на 30...60%. Під впливом тривалого та інтенсивного опромінення відбуваються структурні зміни продуктів гідратації цементу. Встановлено, що такий продукт гідратації як гідроксид кальцію стає аморфним і, реагуючи з вуглекислим газом, перетворюється в кальцит.

Виділення води з цементного каменю посилюється при спільній дії радіаційного опромінення і механічного навантаження. Під таким навантаженням воно в 1,5...3 рази більше ніж у ненавантаженому стані. Втрата води та усадка цементного каменю, що виникає при цьому, під дією механічного навантаження призводить до розвитку повзучості. Міра повзучості цементного каменю при опроміненні до $10,4 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-2}$ у 10 разів перевищує його повзучість при звичайному нагріванні до 250...300° С.

Під дією на бетон радіаційного опромінення йдуть деструктивні процеси, як у цементному камені, так і в заповнювачах. Відчутні деструктивні процеси в останніх виявляються при інтегральному потоці нейтронів з флюенсом більш $3 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-2}$. З підвищенням дози випромінювання в структурі заповнювачів накопичуються дефекти, що призводять до анізотропного розширення їх кристалічної решітки, аморфізації та зниження щільності. Критична величина опромінення, після якої має місце значне зниження щільності і перехід в аморфний стан, залежить від виду породоутворюючих мінералів, що входять до відповідних гірських порід, з яких виготовлені заповнювачі. Так, для польового шпату критичне значення флюенсу нейтронів складає $7 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-2}$, а для кристалічного кварцу – $7 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-2}$.

Радіаційна стійкість гірських порід зростає зі зменшенням вмісту кристалічного кремнезему і розмірів кристалів. У вилитих породах радіаційна стійкість вища, ніж у

глибинних. З підвищенням основності також відзначається певне підвищення радіаційної стійкості.

Наприклад, для Українського граніту критичне значення флюенсу нейтронів – $1,5 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-2}$. При інтегральному потоці нейтронів вже $2,8 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-2}$ щільність породи знижується на 15%, лінійні відносні деформації досягають 6...7% і граніт руйнується. У той же час базальти, опромінені потоком нейтронів до $2,8 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-2}$, зменшують щільність лише до 3,4%. Для них лінійні відносні деформації при такій характеристиці опромінення становлять всього 1,6% і ознаки руйнування не виявляються.

Допустимий потік (флюенс) нейтронів при опроміненні бетону в 10^{23} нейтр-м² залежить від виду крупного заповнювача:

Граніт, діорит, сієніт, габро, лабрадорити	2 ... 5
Дуніти, базальт, діабаз, андезит, олівініти	5 ... 15
Серпентиніт	10 ... 50
Вапняк	10
Магнетит, гематит	10 ... 100
Хроміт	200

Максимальні відносні деформації бетону досягають приблизно 0,7% при опроміненні $0,5 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-2}$. Це значно менше, ніж у заповнювачів, але більше ніж у цементного каменю.

Модуль пружності бетону з підвищенням дози опромінення знижується внаслідок накопичення структурних дефектів. Ефект зниження модуля пружності при радіаційному впливі на бетон зростає зі збільшенням в ньому об'ємної концентрації заповнювачів, підвищенням їх крупності. З підвищенням крупності заповнювачів зростають радіаційні деформації бетону, збільшується концентрація напружень в контактній зоні, що веде до утворення і розкриття тріщин.

При тривалому інтенсивному радіаційному опроміненні бетону його міцність на стиск знижується приблизно в 4 рази, а міцність на розтягування в 2 рази.

Для порівняльної оцінки захисних властивостей різних бетонів можна використовувати такий показник як "товщина

шару половинного ослаблення" ($T \cdot 1/2$). Вона дорівнює товщині шару бетону, необхідній для ослаблення інтенсивності випромінювання в два рази.

$$T \frac{1}{2} = 0,693\lambda,$$

де λ – довжина релаксації, см, чисельно рівна товщині шару матеріалу, що послабляє потік випромінювання в e раз (тобто в 2,718 рази).

Для зменшення товщини захисту необхідно знижувати $T \frac{1}{2}$ шляхом підвищення щільності бетону, збільшення кількості зв'язаної води і застосування спеціальних добавок (боровмісних та ін.).

12.2. Особливо важкі і гідратні бетони

Здатність матеріалу поглинати γ -випромінювання пропорційна його густині. Для ослаблення потоку нейтронів в матеріалі, навпаки, повинні бути присутніми елементи з малою атомною масою, як, наприклад, водень. Бетон є ефективним матеріалом для біологічного захисту ядерних реакторів, оскільки в ньому вдало поєднуються, при порівняно низькій вартості, відносно висока густина і вміст певної кількості водню в хімічно зв'язаній воді. Для зменшення товщини захисних екранів при зведенні атомних електростанцій і підприємств з виробництва ізотопів поряд зі звичайними застосовують особливо важкі бетони з середньою густиною від 2500 до 7000 $\text{кг}/\text{м}^3$ і гідратні бетони з високим вмістом хімічно зв'язаної води. Для одержання особливо важких бетонів використовують важкі природні або штучні заповнювачі: магнетитові, гематитові або лімонітові залізні руди, барит, металевий скрап, свинцевий дріб та ін.

Середня густина ($\text{т}/\text{м}^3$) особливо важких бетонів на різних заповнювачах:

магнетитові	2,8 ... 4
гематитові	3,3 ... 3,9

баритовий 3,3 ... 3,6

з чавунним скрапом 3,7 ... 5

Лімонітовий, магнетитовий і гематитовий заповнювачі виготовляють із залізних руд певного складу. Магнетитові і гематитові заповнювачі отримують подрібненням і розсівом залізних руд, до складу яких входять відповідні мінерали – магнетит (Fe_3O_4) або гематит (Fe_2O_3). Густина магнетитової і гематитової руд 4,4...4,9 г/см³. Заповнювачем баритового бетону служить барит або баритова руда.

До заповнювачів для особливо важких бетонів висувають такі вимоги: мінімальна міцність при стиску чавунного скрапу – 200 МПа, магнетиту – 200 МПа, лимоніту і гематиту – 35 МПа, бариту – 40 МПа; вміст оксидів Al_2O_3 і Fe_2O_3 в бариті не більше 1% від маси заповнювачів; водопоглинання магнетиту та бариту – 1...2, лимоніту і гематиту – 9...10%.

Таблиця 12.1

Фізико-механічні властивості окалини

Показник	Окалина				
	листопрокатного цеху		прокатного цеху		машинної вогневої зачистки
	Фракції, мм				
	5...10	0...5	5...10	0...5	0...5
Модуль крупності	-	3,447	-	3,2	1,6
Густина, т/м ³	5,496		5,396		5,557
Пористість, %	9	3,75	4,256	2,73	13,8
Насипна густина, т/м ³	1,82	2,32	2,18	2,615	2,68
Насипна густина у щільному стані, т/м ³	2,08	2,85	2,59	3,19	2,97
Водопоглинання	5,44	-	0,49	-	-
Вміст пластинчатих і голчатих зерен, %	17,3	-	47,6	-	-

Для отримання надважких бетонів застосовують дріб з чавуну або сталі, а також різні відходи машинобудівних і

металургійних підприємств. На практиці бетони із застосуванням металевого дробу застосовують рідко. З відходів металургії найбільший інтерес представляють прокатні окалини, окалина машинної вогневої зачистки і конвертерні шлаки. Фізико-механічні властивості окалини різних видів наведені в табл.12.1.

Характерні склади поширених видів особливо важких бетонів наведені в табл.12.2.

Таблиця 12.2

Склади особливо важких бетонів

Вид бетону	Витрата матеріалів на 1 м ³ бетону, кг				Середня густина бетону, кг/м ³
	цементу	дрібного заповнювача	крупного заповнювача	води	
Магнетитовий	389	1365	1762	184	3700
Гематитовий	300	1100	2140	195	3735
Баритовий	395	1352	1800	193	3740
З металічним заповнювачем	395	2637	2637	170	5839

У поєднанні із заповнювачами, що мають високу густина, можуть використовуватися і звичайні пісок або щебінь. Густина таких бетонів з комбінованими заповнювачами має проміжні значення.

Для захисних огорожень від одночасного впливу гамма і нейтронного випромінювань застосовують *гідратні бетони*, що містять важкі заповнювачі, і одночасно підвищений вміст хімічно зв'язаної води. Такі заповнювачі отримують зазвичай на основі лімонітомістких залізних руд і серпентиніту.

Лимоніт - бурий залізняк ($2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) має густина 3,2...4,0 г/см³. Середня густина бетону з лімонітовим піском і звичайним щебенем з граніту та інших вивержених порід – 2,4...2,5 т/м³, з баритовим щебенем 3...3,2, магнетитовим щебенем 2,9...3, 8, металевим скрапом 3,6...5 т/м³.

Серпентиніт – метаморфічна гірська порода, що складається, в основному, з мінералу – серпентину $[Mg_3(Si_4O_{10})(OH)_8]$. Густина породи 2,4...2,9 г/см³, твердість за шкалою Мооса 2,4...3,5, міцність 40...60 МПа. Для серпентиніту характерний великий вміст хімічно зв'язаної води (10...15% за масою), яка помітно втрачається при температурі понад 450° С. Густина бетонів, приготовлених на серпентинитовому щебені і піску, складає 2,2...2,35 т/м³. Кристалізаційна вода, що міститься в лимонітах і серпентинітах, є джерелом утворення водню для уповільнення нейтронів при температурі до 200° С.

З метою поліпшення захисних властивостей бетону від нейтронного випромінювання в його склад вводять добавки, що містять легкі елементи – літій, кадмій, бор, наприклад, карбід бору, хлористий літій, сірчаноокислий кадмій та ін. Введення в бетон таких добавок у порівняно невеликій кількості (наприклад, карбіду бору 24...37 кг/м³) дозволяє зменшити товщину захисних екранів і знизити температуру їх радіаційного розігріву.

Таблиця 12.3

Параметри послаблення бетонами нейтронного та гамма-випромінювань

Бетон	Густина, т/м ³	Коефіцієнти накопичення на товщині 100...150 см			Коефіцієнт послаблення гамма-випромінювання
		проміжних нейтронів	теплових нейтронів	гамма-випромінень	
Серпентинитовий	1,93	20	82	93	7,01
Магнетитовий	3,28	18	8	100	11,9
Магнетитовий на рідкому склі	3,16	900	180	800	11,46
Гематитовий	3,58	900	170	1000	13,01
На скрапі	4,2	20	6,0	20	15,22
На скрапі з добавкою бору	4,22	17	0,1	2,5	15,3

У табл.12.3 наведені за даними В.Б.Дубровського основні параметри ослаблення нейтронного та гамма-випромінювань бетонів на різних заповнювачах.

У бетонах на портландцементі кількість зв'язаної води в цементному камені при нормальній температурі можна приймати приблизно 15% маси цементу в 28-добовому віці і 20% – в 12 місячному віці. При підвищенні температури в процесі експлуатації захисних бетонних конструкцій вміст хімічно зв'язаної води зменшується у відповідності з нижче наведеними даними:

$^{\circ}\text{C}$	%	$^{\circ}\text{C}$	%
20...50	100	300	40
100	80	400	25
150	70	500	10
200	60	600	0

Із гідратних сполук, що входять до складу цементного каменю, найбільшу кількість хімічно зв'язаної води має гидросульфоалюмінат кальцію – до 45%. Розширні та сульфатно-шлакові цементи, при твердненні яких утворюється значна кількість гидросульфоалюмінату, мають поліпшені захисні властивості. Підвищену захисну здатність мають також глиноземисті цементи, при твердненні яких утворюється, в основному, гідроалюмінат кальцію $\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 10\text{H}_2\text{O}$, який при підвищенні температури переходить у $2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 8\text{H}_2\text{O}$, а потім у $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Затверділий цементний камінь на основі глиноземистого цементу хімічно зв'язує близько 26...28%, гіпсоглиноземистий 30...32 % води.

Захисні властивості портландцементу поліпшуються також при введенні в його склад сполук, що містять барій та бор.

З нецементних мінеральних в'язучих матеріалів для захисних гідратних бетонів представляють інтерес магнезіальні в'язучі, що замішуються розчинами хлористого або сірчанокислого магнею. При замішуванні каустичного магнезиту або доломіту розчином хлористого магнею утворюються

комплексні солі типу оксихлоридів $m\text{MgO} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. Подібно оксихлоридам у результаті реакції між MgO і водним розчином MgSO_4 утворюються оксисульфати.

Розроблено також особливо важкі бетони для захисту від радіації на основі рідкого скла, а також сірчаного в'язучого.

При проектуванні складів радіаційно-захисних бетонів заданої міцності використовують також як і для звичайних бетонів емпіричні залежності, що зв'язують міцність і цементно-водне відношення (рис.12.3) На міцність особливо важких бетонів істотно впливає міцність заповнювачів (рис.12.4) Зі збільшенням Ц/В лінійно збільшується міцність бетону, а також кількість хімічно зв'язаної води. З міцністю при стиску скорельовані міцність при осьовому розтягу, розтягу при згині, зчеплення з арматурою і модуль пружності.

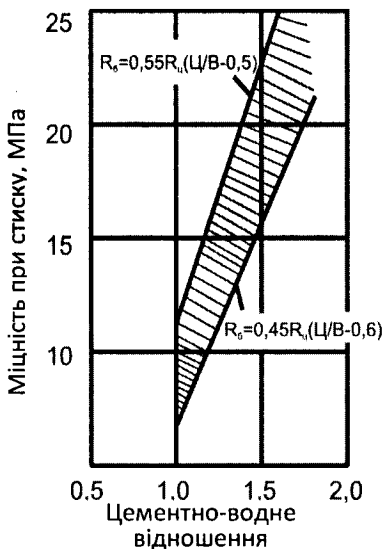


Рис.12.3. Графік для вибору цементно-водного відношення особливо важких бетонів

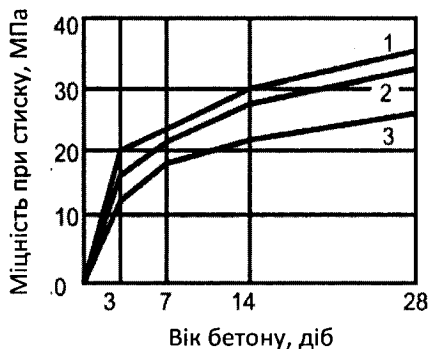


Рис.12.4. Залежність міцності особливо важкого бетону при стиску від виду дрібного заповнювача:

1 – магнетит; 2 – лимоніт; 3 – кварцовий пісок.
Крупний заповнювач у всіх трьох видах бетону – металічний скрап, густина бетону $5,3 \text{ т/м}^3$

Як і для звичайних важких бетонів, для особливо важких бетонів водопотреба бетонних сумішей залежить від необхідних показників рухомості або жорсткості і особливостей вихідних матеріалів (рис.12.5). На водопотребу і легкоукладальність бетонних сумішей істотно впливає співвідношення вмісту дрібних і крупних заповнювачів. Рекомендований відносний вміст піску в особливо важких бетонних сумішах в залежності від їх густини наведено в табл.12.5.

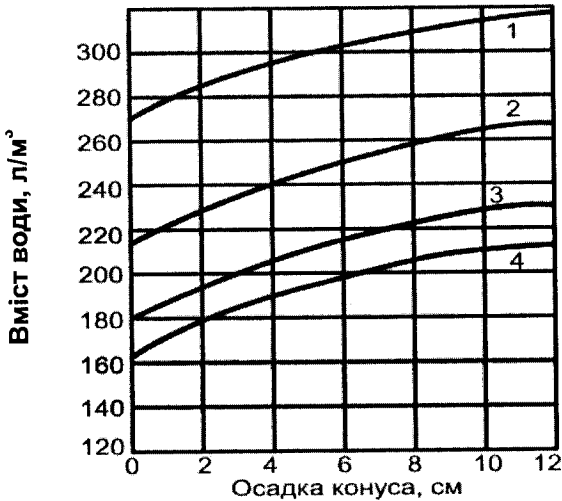


Рис. 12.5. Водопотреба бетонних сумішей для особливо важких і гідратних бетонів

Заповнювачі (дрібний:крупний): 1– лимоніт:лимоніт; 2– магнетит: магнетит; 3 – барит:барит; 4 – кварцовий пісок: гранітний щебінь

Коефіцієнт лінійного розширення при нагріванні від 0 до 200° С для бетонів з особливо важкими заповнювачами, як правило, нижчий, ніж для звичайного важкого бетону. Якщо для останнього він приблизно дорівнює $1 \cdot 10^{-5}$, то, наприклад, для лимонітового бетону – $0,76 \cdot 10^{-5}$, для комбінованих бетонів з лимонітовими або гематитовими заповнювачами – $0,63 \cdot 10^{-5}$.

Усадка особливо важких бетонів за першу добу тверднення у формах коливається у межах від 100 до 1100 мкм/м. Найбільшу усадку в першу добу має баритовий бетон (від 500 до 1100 мкм/м), найменшу – лимонітовий (100...200 мкм/м). Повна усадка цих бетонів становить відповідно 1450 і 750 мкм/м.

Таблиця 12.4

Відносний вміст піску в особливо важких бетонних сумішах

Густина заповнювача г/см ³	Середня густина заповнювача, т/м ³											
	1,5				2,6				3,7			
	Середня густина дрібного заповнювача, т/м ³											
	1,5	2,0	2,4	3,0	1,5	2,0	2,4	3,0	1,5	2,0	2,4	3,0
6,6	-	-	-	-	0,36	0,42	0,44	0,51	0,25	0,29	0,32	0,36
4,2	0,49	0,56	0,61	0,66	0,28	0,33	0,36	0,4	-	-	-	-
3,2	0,45	0,51	0,56	0,61	-	-	-	-	-	-	-	-
2,7	0,37	0,44	0,47	0,53	-	-	-	-	-	-	-	-

Баритові бетони неводостійкі, їх не можна застосовувати в спорудах, що експлуатуються в проточній воді. Ці бетони, а також бетони на лимонітовому піску і на чавунному скрапі мають порівняно низьку морозостійкість. Лимонітові бетони мають найбільші втрати маси при нагріванні до 100⁰ С, найменшими втратами маси характеризуються бетони на чавунному скрапі.

Для отримання досить однорідних бетонних сумішей із застосуванням важких заповнювачів подовжують час перемішування (до 2 хв і більше) і зменшують об'єм замісів.

Велика відмінність в густині цементного тіста і заповнювачів призводить до легкого розшарування особливо важких бетонних сумішей при транспортуванні і ущільненні. Для запобігання розшарування застосовують малорухомі суміші, що транспортуються в автобетонозмішувачах з

періодичним перемішуванням або в цебрах із дном, що відкривається.

В особливо важких бетонних сумішах рекомендується для запобігання розшарування застосовувати лимонітові піски. В'язкість розчину на лимонітовому піску в 12...15 разів більша в'язкості розчину на кварцовому піску, що сприяє отриманню однорідної бетонної суміші, проте ускладнює її укладання та ущільнення.

Особливо важку бетонну суміш укладають горизонтальними шарами товщиною до 25 см з рівномірним ущільненням вібрацією. Можливе також роздільне укладання, коли цементний розчин нагнітається у заздалегідь засипаний в опалубку і ущільнений крупний заповнювач.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ахвердов И.Н. Теоретические основы бетоноведения. /И.Н.Ахвердов//Підручник - Мн.: Вища школа, 1991 – 188 с.
2. Баженов Ю. М. Перспективы применения математических методов в технологии сборного железобетона./ Ю.М.Баженов, В.А.Вознесенский // – М.: Стройиздат, 1980. – 192 с.
3. Баженов Ю. М. Способы определения состава бетона различных видов/Ю.М.Баженов// Учеб. пособие. –М.: Стройиздат,1975. – 272 с.
4. Баженов Ю.М. Бетонополимеры./Ю.М.Баженов// М.: Стройиздат, 1983. – 472 с.
5. Баженов Ю.М. Технология бетона./Ю.М.Баженов// М.:АСВ, 2007 – 524 с.
6. Баженов Ю.М. Модифицированные высококачественные бетоны. /Ю.М.Баженов, В.С.Демьянова, В.И.Калашников// М.: АСВ, 2006 – 368 с.
7. Баженов Ю.М. Ограждающие конструкции с использованием бетонов низкой теплопроводности. /Ю.М.Баженов, Е.А.Король, В.Т.Ерофеев, Е.А.Митина // М.: АСВ, 2008 – 319 с.
8. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны./В.Г.Батраков// Теория и практика. – М.: Технопроект,1998 – 768 с.
9. Большаков В.И., Дворкин Л.И. Строительное материаловедение./В.И.Большаков,Л.И.Дворкин//Днепропетровск: РВА "Днепр – VAL", 2004 – 677 с.
10. Венюа М. Цементы и бетоны в строительстве./ М. Венюа // М.: Стройиздат,1980. – 415 с.
11. Вербецкий Г.П. Прочность и долговечность бетона в водной среде./ Г.П.Вербецкий// М.: Стройиздат, 1976. – 128 с.
12. Вознесенский В. А. Современные методы оптимизации композиционных материалов./ В.А.Вознесенский, В.М.Выровой, В.Я.Керш и др.// К.: Будівельник, 1983. – 144 с.
13. Вознесенский В. А. Численные методы решения строительно-технологических задач/В.А.Вознесенский,Т.В.Ляшенко, Б.Л.Огарков 1989. – 328 с.
14. Гоц В.І. Бетони і будівельні розчини / В.І. Гоц // Підручник. – К.: ТОВ УВПК «ЕксОб»: КНУБА, 2003. – 472 с.

15. Горчаков Г.И. Повышение морозостойкости бетона в конструкциях промышленных и гидротехнических сооружений./ Г.И.Горчаков, М.М.Капкин, Б.Г.Скрамтаев // М.: Стройиздат, 1965. – 195 с.
16. Грушко И.М. Повышение прочности и выносливости бетона./ И.М.Грушко, А.Г.Ильин, Э.Д.Чихладзе// Харьков: Вища школа, 1986. – 149 с.
17. Гусев Б.В. Бетон и железобетон./ Б.В.Гусев// Справочник. -М.: Стройиздат, 1998. – 250 с.
18. Дворкін Л.Й. Будівельне матеріалознавство / Л.Й. Дворкін, С.Д. Лаповська. Підручник. – Рівне: НУВГП, 2016. – 448 с.
19. Дворкін Л.Й. Будівельне матеріалознавство / Л.Й. Дворкін // Підручник. – Рівне, НУВГП, 2009. – 309 с.
20. Дворкін Л.Й. Мінеральні в'язучі матеріали / Л.Й. Дворкін, О.Л. Дворкін // Підручник. – Рівне, РДТУ, 2000.
21. Дворкін Л.Й. Опоряджувальні будівельні матеріали / Л.Й. Дворкін, О.Л. Дворкін. // Навч. посіб. – Рівне: НУВГП, 2011. – 291 с.
22. Дворкін Л.Й. Ефективні гіпсові матеріали / Л.Й. Дворкін, О.М. Гавриш, О.В. Безусяк та ін. // Монографія. – К. : «СПД Павленко», 2013. – 240 с.
23. Дворкін Л.Й. Використання техногенних продуктів у будівництві / Л.Й. Дворкін, О.Л. Дворкін, К.К. Пушкарьова // Посібник. – Рівне: НУВГП, 2009. – 339 с.
24. Дворкин Л.И. Строительные материалы для энергетических сооружений. /Л.И.Дворкин// М.: Энергоатом издат, 1989. –280 с.
25. Дворкін Л.Й. Основи бетонознавства / Л.Й. Дворкін, О.Л. Дворкін // К. : «Основа», 2007. – 613 с.
26. Дворкин Л.И. Современные отделочные и облицовочные материалы./ Дворкин Л.И., Дворкин О.Л. // М.: Рипол классик, 2010 – 576 с.
27. Дворкин Л.И. Справочник по строительному материаловедению / Л.И. Дворкин, О.Л. Дворкин // М. : «Инфра-Инженерия», 2010. – 472 с.
28. Дворкін Л.Й. Бетони і будівельні розчини / Л.Й. Дворкін, О.Л. Дворкін // Підручник – Київ, «Основа», 2008. – 613 с.

29. Дворкін Л. Й. Проектування складів бетону із заданими властивостями./ Л.Й.Дворкін, О.Л.Дворкін, Ю.В.Гарніцький// Рівне. –2000. – 215 с.
30. Дворкін Л. Й. Проектування і аналіз ефективності складів бетону. /Л.Й.Дворкін, О.Л.Дворкін, М.В.Горячих, В.М.Шмигальський //Рівне, НУВГП, 2009. – 173 с.
31. Дворкін Л. Й. Розв'язування будівельно-технологічних задач методами математичного планування експерименту./ Л.Й.Дворкін, О.Л.Дворкін, В.В.Житковський// Рівне. – 2011. – 174 с.
32. Дворкин Л. И. Оптимальное проектирование составов бетонов./Л.И.Дворкин// Львов.: Вища школа, 1981. –160 с.
33. Дворкін Л.Й. Довідник з будівельного матеріалознавства / Л. Й. Дворкін, О.Л. Дворкін, О.М. Бордюженко // Навч. пос. – Рівне: НУВГП, 2011. – 438 с.
34. Дворкин Л.И. Учебно-практическое пособие Строительное материаловедение / Л.И. Дворкин, О.Л. Дворкин // М. : «Инфра-Инженерия», 2013. – 832 с.
35. Дворкин Л. И. Строительное материаловедение. /Л.И.Дворкин, О.Л.Дворкин// С.Пб.: Стройбетон, 2006. – 682 с.
36. Дворкин Л.И. Многофакторное прогнозирование свойств и проектирование составов бетонов./ Л.И.Дворкин, И.Б.Шамбан// – М.: Стройиздат, 1992. – 132 с.
37. Дворкин Л.И. Строительные минеральные вяжущие материалы./ Л.И.Дворкин, О.Л.Дворкин// М.: Инфра-Инженерия, 2011 – 544 с.
38. Дворкін Л.Й. Випробування бетонів і розчинів. Проектування їх складів / Л.Й. Дворкін, В.І. Гоц, О.Л. Дворкін // Навч. пос. – Київ: «Основа», 2014. – 304 с.
39. Дворкин Л.И. Практическое бетоноведение в вопросах и ответах / Л.И. Дворкин, О.Л. Дворкин, О.М. Бордюженко // Справочник. – С.Петербург: ООО «Стройбетон», 2008. – 328 с.
40. Дворкин Л.И. Эффективные литые бетоны./ Л.И.Дворкин, В.П.Кизима// Львов,"Вища школа",1986 – 144 с.
41. Дворкин Л.И. Цементные бетоны с минеральными наполнителями/Л.И.Дворкин,В.И.Соломатов,В.Н.Выровой// К.:Будівельник, 1991 – 136 с.

42. Дворкин Л.И. Материалы и изделия в мелиоративном строительстве./ Л.И.Дворкин, И.А.Соляной, И.Ф.Бойко// Киев.: Будивельник, 1982 – 140 с.
- 43.Дворкин Л.И. Строительные материалы для гидротехнических сооружений./ Л.И.Дворкин, П.П.Цулукидзе // М.: Энергия, 1978 – 247 с.
44. Дорожно-строительные материалы /Грушко И.М., Королев И.В., Борт И.М., Мищенко Г.М. – М.: Транспорт, 1991 – 357 с.
45. Дорофеев В.С. Технологическая поврежденность строительных материалов и конструкций. / В.С.Дорофеев,В.Н. Выровой// Одесса, 1998. - 165 с.
46. Комохов П.Г. Долговечность бетона и железобетона./ П.Г.Комохов, В.М.Латынов, Т.В.Латынова, Р.Ф.Ваганов //Уфа: "Белая река", 1998.- 216 с.
47. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты /Москвин В.М.,Иванов Ф.М., Алексеев С.Н., Гузеев Е.А. – М.: Стройиздат, 1980 – 536 с. Илл.
48. Кривенко П.В. Долговечность шлакощелочного бетона. / П.В.Кривенко, Е.К.Пушкарева// К.: Будивельник, 1993. – 224 с.
- 49.Кривенко П.В. Строительное материаловедение / П.В. Кривенко, Е.К. Пушкарева и др. – К. : «Основа», 2007. – 704 с.
- 50.Кривенко П.В. Будівельне матеріалознавство /П.В. Кривенко, К.К. Пушкарева, В.Б. Барановський та ін. // Підручник – К. : «Ліра-К», 2012. – 624 с.
51. Львович К.И. Песчаный бетон и его применение в строительстве/К.И.Львович// С.Пб.: Строй Бетон, 2007 – 320 с.
52. Михайлов В.В. Расширяющийся и напрягающий цементы и самонапряженные железобетонные конструкции./ В.В.Михайлов, С.Л.Литвер // М.: Стройиздат, 1974 – 312 с.
53. Несветаев Г.В. Бетоны./Г.В. Несветаев// Учебное пособие - Ростов н/Д: Феникс, 2011 - 381 с.
31. Патуреев В.В. Полимербетон./ В.В. Патуреев// М.: Стройиздат, 1986 – 256 с.
- 54.Пушкарева К.К. Матеріалознавство (для архітекторів і дизайнерів) / К.К. Пушкарева, М.О. Кочевих, О.А. Гончар, О.П. Бондаренко // Підручник – К.: «Ліра-К», 2012. – 592 с.

55. Рунова Р.Ф. В'язучі речовини / Р.Ф. Рунова, Л.Й. Дворкін, О.Л. Дворкін, Ю.Л. Носовський. – Київ, «Основа», 2012. – 448 с.
56. Сизов В. П. Проектирование составов тяжелого бетона./В.П.Сизов// М.: Стройиздат, 1980. – 144 с.
57. Стольников В.В. Исследования по гидротехническому бетону. /В.В.Стольников//М.: Госэнергоиздат, 1962. – 330 с.
58. Строительство атомных электростанций / Под ред. В.Б. Дубровского, -М.: Стройиздат, 1985.
59. Судаков В.Б. Рациональное использование бетона в гидротехнических сооружениях. / В.Б.Судаков//М.: "Энергия", 1976. – 241 с.
60. Ушеров–Маршак А.В. Бетоноведение: лексикон./ А.В. Ушеров–Маршак // М.: РИФ "Стройматериалы", - 2009 – 112 с.
61. Ушеров–Маршак А. В. Бетони та сухі будівельні суміші./ А.В. Ушеров–Маршак,К.В.Латорець// Тлумачний словник. – Харків Колорит, 2010. –100 с.
62. Штарк Й. Долговечность бетона./Й.Штарк, Б. Вихт//- Киев: Оранта, 2004.- 295 с.
63. Edward G., Nawy P. Fundamentals of High – Perforance Concrete: - Willy, 2001.
64. Lea's Chemistry of cement and concrete, ed. by Peter C.Hewlett, 1997.- 1053 p.
65. Neville A.M. Properties of Concrete. Prentice Hall, 1995. - 864 p.
66. Orchard D.F. Concrete Technology. – London, 1979.- Vol.1,2.- 1033p.
67. Dvorkin L., Dvorkin O., Ribakov Y. Mathematical Experiments Planning in Concrete Technology. Nova Science Publishers , New York, USA, 2012,172 p.
68. Dvorkin L, Nwoubani S., Dvorkin O. Construction Materials. Nova Science Publishers, New York, USA, 2010, 409p.
- 69.Dvorkin L. Construction materials / L. Dvorkin, S. Nwaubani, O. Dvorkin // Nova Science Publishers, New York, USA, 2010. – 409 p.
- 70.Dvorkin L. Basic of concrete science / L. Dvorkin, O. Dvorkin Amazon, (Kindle edition) /(e-book)/ 2011. – 382 p.

71.Dvorkin L. Multi-Parametric Concrete Compositions Design / L. Dvorkin, O. Dvorkin, Y. Ribakov // Nova Science Publishers, Inc. New York, 2013.– 223 p.

72.Dvorkin L. Construction materials Based on industrial Waste Products / L. Dvorkin, O. Dvorkin, Y. Ribakov // Nova scitnce publisers, 2016. – 242 p.

73.Dvorkin L. Structure and Properties of Building Materials / L. Dvorkin, V. Bolshakov // Trans Tech Publication ine, Zurich, 2016 . – 220 p.

З М І С Т

	Стор.
Передмова	3
1. Вступ. Класифікація бетонів	4
2. Гідротехнічні бетони	11
2.1. Загальні вимоги. Вихідні матеріали	11
2.2. Бетон для масивних гідротехнічних споруд	32
2.3. Гідротехнічний бетон для тонкостінних конструкцій та споруд	72
2.4. Проектування складів гідротехнічних бетонів	92
3. Дорожні бетони.....	119
3.1. Загальна характеристика.....	119
3.2. Властивості дорожніх бетонів і шляхи їх забезпечення	121
3.3. Різновиди цементних дорожніх бетонів	152
4. Високоміцні бетони	167
5. Фібробетони	187
6. Опоряджувальні бетони і розчини. Бетони для підлог	200
6.1. Кольорові бетони	200
6.2. Декоративні розчини	209
6.3. Бетони для підлог	214
7. Теплоізоляційні бетони	230
7.1. Ніздрюваті бетони	230
7.2. Легкі бетони на пористих заповнювачах	245
8. Жаростійкі бетони	262
8.1. Класифікація та загальні вимоги.....	262
8.2. Жаростійкий бетон на портландцементі та шлакопортландцементі	266
8.3. Жаростійкі бетони на алюмінатних цементах та нецементних в'язучих	277
9. Хімічно стійкі бетони	286
9.1. Полімерні бетони	287
9.2. Бетони на основі рідкого скла та сірки	296
10. Розширні і напружуючі бетони	303

10.1.	Безусадочні і розширні бетони	303
10.2.	Напружуючі бетони	312
11.	Електротехнічні бетони	318
11.1.	Електроізоляційні бетони	318
11.2.	Електропровідні бетони	326
12.	Радіаційно-захисні бетони	330
12.1.	Радіаційна стійкість бетону	331
12.2.	Особливо важкі і гідратні бетони	336
	Література.....	345

Навчальне видання

Л.Й.Дворкін

Бетони спеціального призначення

Навчальний посібник

Керівник видавничих проектів — Ястребов А.О.
Друкується в авторській редакції
Дизайн обкладинки — Тишківська Н.М.

Підписано до друку 20.10.2017 р.
Формат 60×84 1/16. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Умовн. друк. аркушів — 20,58.
Обл.-вид. аркушів — 13,43.
Тираж 300 прим.

ТОВ «Видавничий дім «КОНДОР»
Свідоцтво серія ДК № 5352 від 23.05.2017 р.
03067, м. Київ, вул. Гарматна, 29/31
тел./факс (044) 408-76-17, 408-76-25
www.condor-books.com.ua

