

БЕТОНИ ВИСОКОЇ МІЦНОСТІ – ПРОБЛЕМИ РОЗВИТКУ І ВИГОТОВЛЕННЯ

Г.С. Ратушняк, Тадеуш Ценжак,
Л.В. Закорчменний

Вінниця – Люблін (Польща)

Промислове виробництво цементу розпочалося майже 200 років тому. Завдяки корисним властивостям цього в'язучого матеріалу було отримано бетон, який став найбільш поширеним і дешевим конструкційним матеріалом і відкрив нову сторінку в світовій історії розвитку будівництва. В 80-х рр. науковців зацікавили причини втрати стійкості багатьох об'єктів із залізобетону, що були збудовані в післявоєнний період. Під впливом змін температури, агресивних середовищ, неправильного технічного догляду, помилок при розрахунку руйнування об'єктів наступало набагато швидше, ніж було закладено при їх проектуванні. Всесторонній аналіз свідчить, що причиною є сумарна взаємодія технологічних, матеріальних і екологічних чинників. Значне зменшення корозійної стійкості бетонів під впливом атмосферного фактора відбувається внаслідок широкого застосування швидков'язучих цементів, для виробництва яких застосовується клінкер дрібного помелу з підвищеним вмістом фаз C_3S і C_3A . Іншим істотним недоліком є використання хімічних добавок на основі хлору і тонкий захис-

ний шар арматури, що призводить до її швидкої корозії і, як наслідок, – втрати несучої здатності залізобетонних конструкцій.

Сучасна технологія бетону передбачає проектування і дослідження його властивостей з огляду на відповідність їх однорідності в часі. Практичні потреби ставлять щораз вищі вимоги, тому споживчі характеристики бетону повинні постійно підвищуватись, а основою цього є знання залежностей між його структурою і властивостями. Як приклад можна навести застосування залізобетону в будівництві високоповерхових будинків (рис. 1). Спочатку основним матеріалом для їх зведення була сталь. Бетон як конструкційний матеріал взагалі не брали до уваги через його невелику міцність. Але завдяки підвищенню його фізико-механічних характеристик бетон знаходить усе ширше застосування. Впровадження бетонів високої міцності (БВМ) дозволило замінити дорогі сталеві конструкції на значно дешевші залізобетонні.

Бетони високої міцності (англ.: high strength concretes – HSC, або high performance concretes – HPC) (від 60 МПа до 150 МПа) мають такі властивості, як швидкий приріст міцності при бетонуванні, висока густина (завдяки малому показнику w/c), морозостійкість, пластичність (при застосуванні суперпластифікаторів) і відірність на стирання, є вищими порівняно з бетонами середньої міцності. Усе це створило умови для широкого застосування бетонів високої міцності як в спеціальному будівництві, так і в загальному.

У теперішній час бетони високої міцності, що характеризуються високою густиною, довговіч-

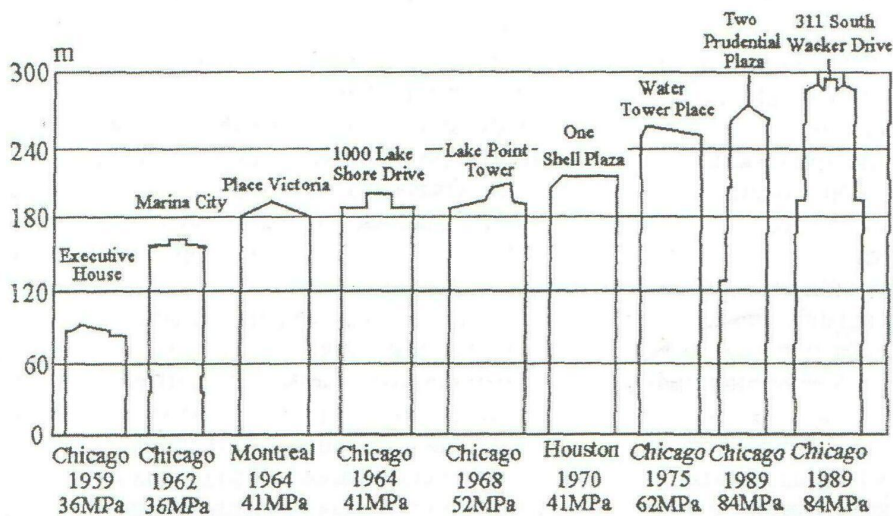


Рис. 1. Застосування бетонів високої міцності при будівництві "хмарочосів" (назва об'єкта, локалізація, рік зведення, міцність бетону).

ністю та причепністю до арматурної сталі, застосовуються в промислових, цивільних, інженерних і спеціальних конструкціях. Швидший приріст міцності при бетонуванні, порівняно зі звичайними бетонами, дозволяє значно прискорити термін виконання опалубних і бетонних робіт у будівництві. Міцність на стиск по j днів можна виразити у виді:

$$R_{bj} = \frac{j}{1,40 + 0,95j} \cdot R_{b28}, \quad (1)$$

де R_{b28} – міцність бетону на стиск після 28 діб тверднення в лабораторних умовах.

Міцність на розтяг:

$$R_{btj} = 0,6 + 0,006 R_{bj}, \quad (2)$$

де R_{bj} – характерна міцність бетону в віці j днів.

Приріст міцності на розтяг швидший за приріст міцності на стиск, але його значення практично затримується у віці 14 днів тверднення бетонної суміші. Для визначення модуля пружності E_j через функцію R_{bj} рекомендується наступна залежність:

$$E_j = K^3 R_{bj}, \quad (3)$$

де K – коефіцієнт, що залежить від виду кришива і знаходиться в межах від 9500 до 12500.

Порівняно з бетонами середньої міцності залежність σ - E для БВМ залишається лінійною при вищому значенні відносно напружень. Також високоміцному бетону притаманні малі значення граничних деформацій на стиск. Кубики, що досліджувалися, знищуються раптовим способом. Про це свідчить значне вертикальне опадання вітки кривої для бетону більшої міцності (B100) (рис. 2).

У бетонах високої міцності перші мікротріщини з'являються в межах 65...75% напружень знищення, тоді як майже 75% з них можна вважати лінійними.

Напруження причепності до арматурних стержнів, що отримані в балках із високоміцного бетону, майже на 40% вищі ніж у балках, виготовлених з бетону середньої міцності.

З урахуванням високої густини таких бетонів можна прогнозувати значне підвищення їх опору на вплив агресивних середовищ і морозостійкості. Застосування суперпластифікаторів не лише зменшує кількість необхідної води ($w/c = 0,25...0,35$), але й дозволяє виготовляти бетони рідкої консистенції. Це значно полегшує бетонування складних перерізів у залізобетонних конструкціях з підвищеним відсотком армування.

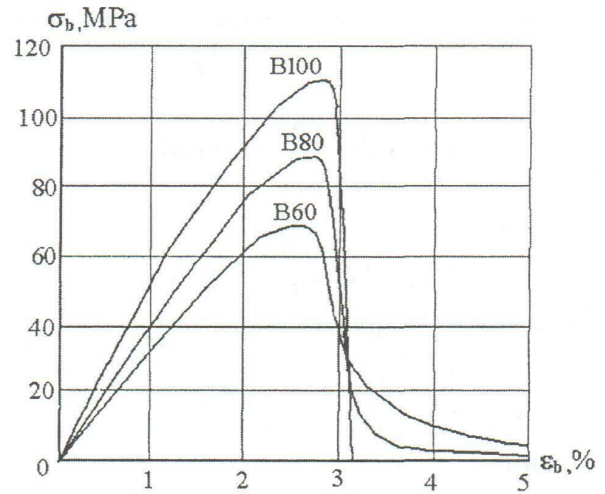


Рис.2. Залежність $\sigma_b - \epsilon_b$.

Сумарне осідання в високоміцному бетоні значно менше, ніж у звичайному бетоні. Також виявлено значно швидше його протікання – 70% напружень проходять протягом перших 10 днів тверднення бетонної суміші.

Для отримання бетону високої міцності з технологічної точки зору необхідно знайти правильну залежність між структурою, тобто – добром складових до суміші, параметрами процесу виготовлення і умовами протікання тверднення цементного тіста, що в результаті характеризують якість, довговічність і споживчі характеристики бетону. Слід зауважити, що алгоритм розв'язку цієї системи з багатьма змінними і взаємозалежними складовими, залежить від розв'язку кожної окремо взятої частини. За основу можна прийняти, що одній структурі бетону, підданій технологічній обробці, відповідає один склад фізико-механічних характеристик. Тобто зміна структури бетону, навіть при однаковій технологічній обробці, в результаті призводить до зміни споживчих характеристик. Тому сучасна технологія дослідження бетону приділяє велику увагу визначенню взаємозалежності між структурою бетону і його характеристиками міцності.

Класична технологія бетону визначає міцність бетону від показника w/c , відсотка гідратації цементу, пористості бетону і деяких елементів його структури: густини окремих складових, їх пористості, а для отримання БВМ вказує на необхідність ретельного добору складових для бетонної суміші в мікро- і макромасштабі з доведенням до їх щільного укладання в формованому виробі і

відповідний догляд твердіючого бетону. В результаті отримуємо матеріал, який крім позитивних фізико-механічних характеристик має свої недоліки, такі як: слабкий зв'язок на стику фаз, неоднорідне розміщення частинок структури, пористості, капілярів, мікротріщини і місцеві дефекти. Тобто отримуємо набагато нижчу міцність бетону, ніж передбачено.

Сучасні тенденції розвитку в технології високоміцних бетонів ґрунтуються на: зменшенні коефіцієнта w/c , введенні до складу суміші мінеральних і хімічних домішок та застосуванні інтенсивної техніки ущільнення.

Хімічні домішки використовувалися протягом багатьох років, що дозволяло отримувати бетони з необхідними характеристиками.

Істотним кроком стало застосування суперпластифікаторів і кремнієвих мікрозаповнювачів. Наприклад, використовуючи суперпластифікатори можна зменшити необхідну для бетонної суміші кількість води навіть до 30%, порівняно з бетонами без них, що в свою чергу призводить до зменшення відношення w/c і, як результат, – підвищення міцності бетону. Саме застосування одночасно суперпластифікаторів, мікрозаповнювачів і найновіших методів ущільнення дозволило отримати бетони класу В 150.

Додавання кремнієвих мікрозаповнювачів покращує зчеплення і заповнення в структурі кришиво – розчин і отримується бажаний з погляду міцності приріст продуктів гідратації. Джерелом отримання кремнієвих мікрозаповнювачів є відходи доменних шлаків, а як активна добавка до бетонів використовуються в основному двоокиси кремнію SiO_2 (87-98%), дрібні частинки яких у кілька разів менші від зерен цементу (питома поверхня біля 20000 cm^2/g), через що добре ущільнюється його зерновий ряд. У бетонній суміші добавка з'єднується з окисом вапна, утворюючи незвичайно стійку структуру бетону, мікроструктура якого значно відрізняється від мікроструктури звичайного бетону. Додаванням кремнієвого мікрозаповнювача до бетонної суміші можна отримати підвищення міцності на стиск майже в 2 рази. В такому бетоні в 10 разів зменшується водопроникність, в кілька разів збільшується відпірність на стирання та вплив морозу, хлору і сірки.

Бетони класу В140 знайшли широке застосування при будівництві об'єктів у таких високорозвинених країнах, як США, Японія, Норвегія. Але лише деякі країни ввели формальні зміни в будівельних нормах і прийняли до застосування бето-

ни вищої міцності на стиск ніж В60, що затримує їх широке впровадження в будівництво. Бетони високої міцності необхідні при зведенні підземних і багатоповерхових об'єктів, виготовленні попередньонапружених залізобетонних конструкцій з економічним перерізом.

Слід зауважити, що границя міцності бетонів на стиск значною мірою залежить від використовуваних у вигляді кришив скальних порід вулканічного походження (базальт, граніт), міцність яких досягає до 300 МПа. Їх довговічність, тобто опір деструкційному впливу часу, є також границею стійкості продуктів людської діяльності, виконаних з цих матеріалів. Причиною руйнування скальних продуктів є їх крихкість, тобто мала (5-10%) міцність на розтяг (R_{bzk}) порівняно з міцністю на стиск. Ця властивість є також характеристикою бетонів, при цьому чим вища міцність бетону на стиск (R_{bk}), тим показник крихкості R_{bk}/R_{bzk} менше корисний. Підвищення характеристик міцності бетону дає в результаті пропорційне зменшення перерізу залізобетонних конструкцій, що в умовах ринкової економіки приносить значну економію матеріалів і прискорює введення в експлуатацію будівельних об'єктів.

Результати дослідів *Blicka R.L.* (Some Factors Influencing High-Strength Concrete, Modern concrete. 1973) свідчать, що оптимальна міцність бетону на стиск при великій кількості цементу і низькому показнику w/c отримується при застосуванні дрібного кришива розміром 9,5...12,7 мм, а максимальний розмір зерен не повинен перевищувати 19...25,4 мм. Одночасно *Alexander K.M.*, (The Greep and Related Properties of Very High: Strength Superplasticized Concrete-Cem. Concr. Res. – Mar. 1980) у своїх дослідях звернув увагу на те, що причепність кришива з розміром зерен 76 мм в десять разів менша від причепності зерен з тієї самої скальної породи розміром 12,7 мм. Кришиво меншого розміру має також позитивний вплив на зріст міцності бетону з огляду на меншу концентрацію напружень навколо зерен, причиною яких є різниця модулів пружності розчину і кришива.

Дрібний заповнювач (пісок) додається до бетонної суміші в першу чергу для зменшення водопотреби. Головною умовою використання дрібного і крупного заповнювачів при виготовленні бетонів високої міцності є усунення пилюватих фракцій і глини, передусім на поверхні зерен. Не рекомендується застосовувати пісок з нерівномірним зерновим складом. Форма зерен повинна бути максимально наближена до форми куба – ви-

довжені і плоскі зерна слід взагалі вилучати. Рекомендується застосування ламаного кришива, що дозволяє збільшити його робочу поверхню і покращує причепність між цементним розчином і заповнювачем.

Слід звернути особливу увагу на те, що при виготовленні і проектуванні бетонів високої міцності велике значення має кількість і якість цементу. В США, наприклад, при виконанні бетонів класу 140>B>85 використовуються портландцементи, що прийняті діючими нормами. Деякі науковці з Данії для отримання бетону B100 пропонують застосовувати спеціальний цементний розчин DSP, міцність на стиск якого становить 350-400 МПа і є вищою від міцності більшості заповнювачів. Даний розчин має в своєму складі кремнієвий пил, зерна якого в декілька разів менше зерен цементу, що майже повністю зв'язує вуглекис валпа. Це разом з інтенсивним вимішуванням з малою кількістю води ($w/c = 0,12$ до $0,20$) дає однорідну і надзвичайно щільну структуру, яка характеризується малою кількістю повітряних пустот і капілярів. У бетонах високої міцності кількість цементу повинна знаходитись в межах 350-450 кг/м³ і не менше ніж 320 кг/м³ при додаванні кремнієвого пилу. Слід дотримуватись оптимального варіанту – кількість цементу має утворювати правильну структуру продуктів гідратації і заповнювати порожнечу між зернами кришив і наповнювачів, забезпечуючи необхідну реологічну структуру бетонній суміші.

Тверднення цементу є складним і багатостороннім процесом. Керування ним вимагає дослідження багатьох явищ з розділу фізико-хімії, термодинаміки та реології. Велика кількість взаємозалежних процесів, таких як розчинення, кристалізації, хімічних реакцій, поширення твердої, рідкої, газоподібної фаз, теплоутворення, дифузії обумовлюють синтез матеріалу складної структури. Експлуатаційні властивості твердіючого цементу (міцність, довговічність і морозостійкість) значною мірою залежать від процесу гідратації цементу. Знання умов протікання цих процесів, одночасно з врахуванням якості і кількості, дозволяє керувати процесом тверднення для отримання структури з необхідними властивостями.

Підсумовуючи, слід відмітити, що проблематика виготовлення і застосування бетонів високої міцності є досить складна і обширна, порушує багато нерозв'язаних і недостатньо досліджених проблем як теоретичних, так і практичних. Як

приклад можна навести недосліджені питання роботи високоміцних бетонів під впливом динамічних і термічних навантажень, міцність при скручуванні, пробитті, зрізі а також причепність до арматурної сталі. Відсутність нормативних документів застосування бетонів високої міцності вимагає виконання індивідуальних аналізів і досліджень. Усі економічні аспекти повинні розглядатися з точки зору значно довшого часу експлуатації будівельних об'єктів і конструкцій. Широке впровадження і використання бетонів високої міцності в високорозвинених західних країнах вказує на значну вигоду їх застосування.

АМКІРОЗ – НОВИЙ ВИСОКО-ЕФЕКТИВНИЙ РОЗРІДЖУВАЧ БЕТОННОЇ СУМІШІ

П.А.Глубіш

Київ

У 1998 – 1999 рр. було освоєно промисловий випуск нового пластифікатора бетонної суміші під технічною назвою амкіроз.

Амкіроз випускається за ТУУВ 2.7-19069017.001-98 у вигляді 30-40%-го водного розчину з РН-5,5-6,0.

Амкіроз – це поверхнево-активна речовина карбоксилатного типу, яка має активні карбоксильні і гідроксильні групи. Амкіроз – препарат багатофункціонального призначення, за допомогою якого можливо в широких межах спрямовано змінювати як технологічні властивості бетонної суміші, так і фізико-механічні властивості бетону.

Суттєвий вплив амкірозу на реологічні властивості бетонної суміші та на фізико-механічні властивості бетону пояснюється його фізичною дією на поверхню цементного зерна.

Найбільш раціонально його можна використати при виготовленні бетонних виробів за умови вивчення механізму його дії на компоненти бетонної суміші.

Тужавіння і твердіння бетонної суміші – це складний багатостадійний фізико-хімічний процес змочування безводних клінкерних мінералів цементу водою з наступними їх гідратацією і гідролізом з утворенням коагуляційних і кристаліч-