

ПРОБЛЕМИ РОЗВИТКУ БЕТОНІВ ВИСОКОЇ МІЦНОСТІ

Проф. Ратушняк Г. С.,

Вінницький державний технічний університет

проф. Тадеуш Ценжак, асп. Закорчменний Л. В.,

Люблінський технічний університет (Польща)

Промислове виробництво цементу розпочалося майже 200 років тому. Отриманий, дякуючи корисним властивостям цього в'язучого матеріалу – бетон, став найбільш поширеним і дешевим конструкційним матеріалом, який відкрив нову сторінку в світовій історії розвитку будівництва. В 80 роках двадцятого століття науковців зацікавили причини втрати стійкості багатьох об'єктів із залізобетону, що збудовані в післявоєнний період. Під впливом змін температури, агресивних середовищ, неправильного технічного догляду, помилок при розрахунку знищення об'єктів наступало набагато швидше ніж було закладено при їх проектуванні, що в свою чергу призводило до зросту коштів на ремонт і експлуатацію. Широкий аналіз цього факту приводить до висновку, що причиною цього була сума факторів технологічних, матеріальних і екологічних. Причиною значного зменшення корозійної стійкості бетонів на атмосферний вплив було широке застосування швидков'язучих цементів для виробництва яких застосовувався клінкер дрібного помолу з підвищеним вмістом фаз C_3S і C_3A . Іншим істотним недоліком було застосування хімічних добавок на основі хлору і малий захисний шар арматури, що призводило до її швидкої корозії і як наслідок – втрати несучої здатності залізобетонних конструкцій [1].

Сучасна технологія бетону передбачає проектування і дослідження його властивостей з огляду на відповідність їх однорідності в часі практичні потреби ставлять що раз вищі вимоги, тому споживацькі 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 з огляду на невелику міцність, але з розвитком і підвищенням фізико-механічних характеристик він знаходить що раз ширше застосування. В великій мірі сталося це дякуючи розвитку і впровадженню бетонів високої міцності (БВМ). Це дозволило замінити дорогі сталеві конструкції на значно дешевші з залізобетону.

В істоті, зріст зацікавленням бетонами високої міцності (англ.: high strength concretes – HSC, або high performance concretes - HPC) не виникає лише з факту, що вони мають міцність на стиск від 60 МПа навіть до 150 МПа, але передовсім з таких властивостей як швидкий приріст міцності при бетонуванні, висока щільність (завдяки малому показнику w/c), морозостійкість, пластичність (при застосуванні суперпластифікаторів) і відпирність на стирання, порівняно з бетонами середньої міцності. Усе це створило умови їх широкому застосуванню як в спеціальному будівництві, так і в загальному [2].

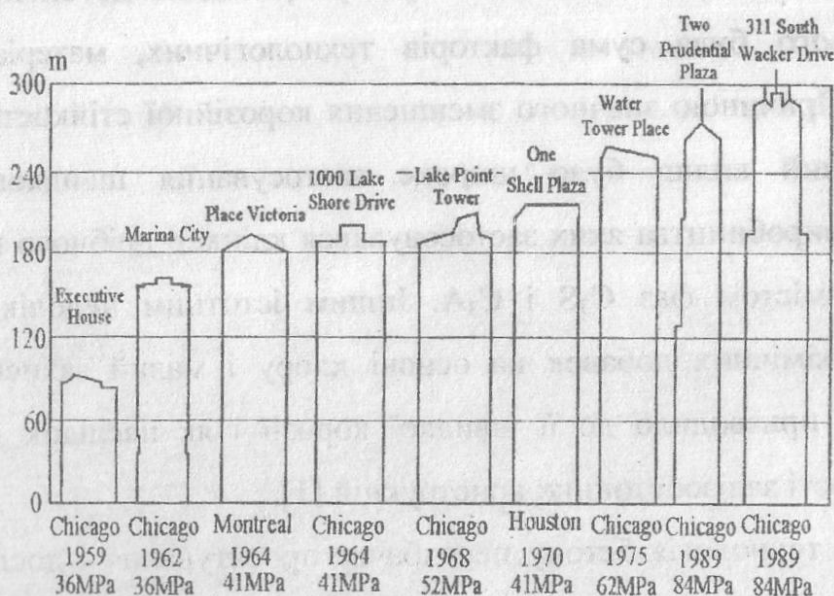


Рис.1. Застосування бетонів високої міцності при будівництві “хмарочосів” (назва об’єкту, локалізація, рік зведення, міцність застосованого бетону).[3]

В наші дні бетони високої міцності, що характеризуються високою щільністю, довговічністю і причепністю до арматурної сталі створили нові можливості їх застосування в конструкціях промислових, цивільних, інженерних і спеціальних. Значно швидший приріст міцності при встановленні, порівняно з звичайними бетонами, дозволяє значно прискорити термін виконання опалубочних і бетонних робіт в будівництві. Міцність на стиск по j днів можна виразити у вигляді:

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

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

$$\text{Міцність на розтяг: } R_{btj} = 0,6 + 0,06 R_{bj}, \quad (2)$$

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

Приріст міцності на розтяг є ще швидший як 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} можемо прийняти наступну залежність:

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

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

Порівняно з бетонами середньої міцності залежність σ - E для БВМ залишається лінійною при вищому значенню стосовно напружень. Також високоміцному бетону притаманні малі значення граничних деформацій на стиск. Кубики, що піддані дослідженню, знищуються раптовим способом, а вітка опадання кривої більше вертикальна для вищого значення міцності бетону, що представлено на рис.2.

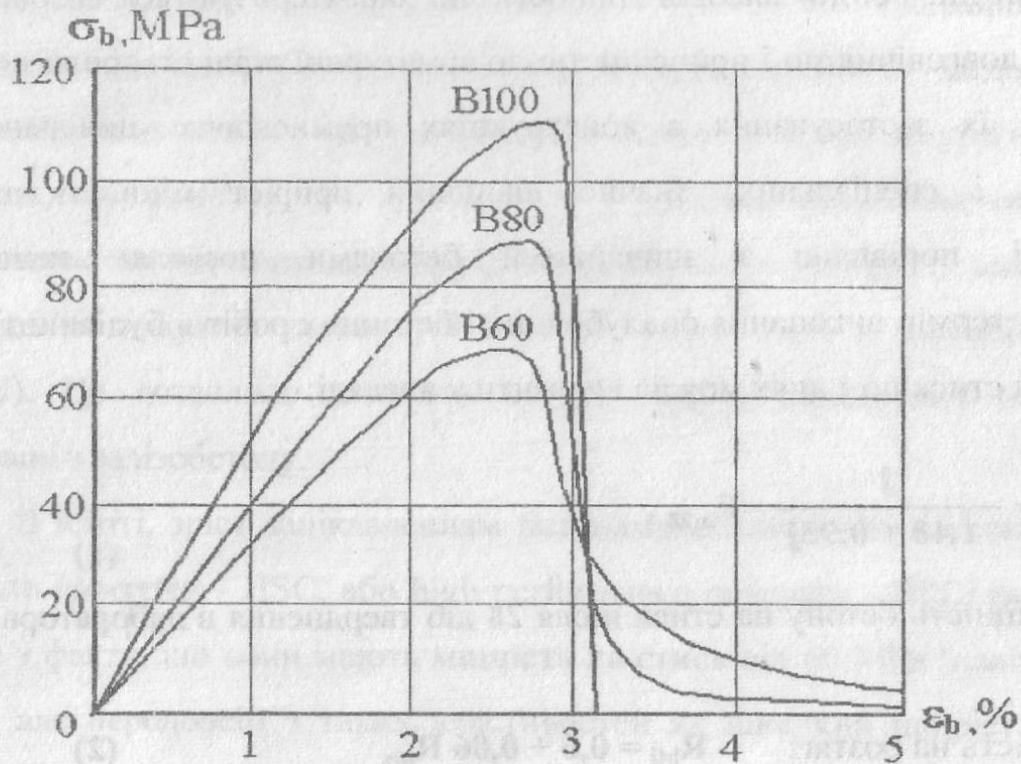


Рис.2. Залежність $\sigma_b - \epsilon_b$ [4].

В цих бетонах перші мікротріщини з'являються в границях 65-75% напружень знищення, тоді як майже 75% з них можна вважати за лінійні.

Напруження причепності до арматурних стержнів, що отримані в балках виконаних з високоміцного бетону, вищі майже на 40% від отриманих в випадку балок, виготовлених з бетону середньої міцності.

З уваги на високу щільність даних бетонів, можна ствердити значне підвищення опору на вплив агресивних середовищ і морозостійкості. Застосування суперпластифікаторів не лише приводить до зменшення необхідної кількості води ($w/c = 0,25 \div 0,35$), але й дозволяє виконувати бетони рідкої консистенції, що значно полегшує бетонування складних перерізів в залізобетонних конструкціях з підвищеним процентом армування.

Сумарна усадка в високоміцному бетоні значно менша ніж в бетоні звичайному. Також стверджено значно швидший її перебіг – 70%

напружені, проходять на протязі перших 10 днів тверднення бетонної суміші (8).

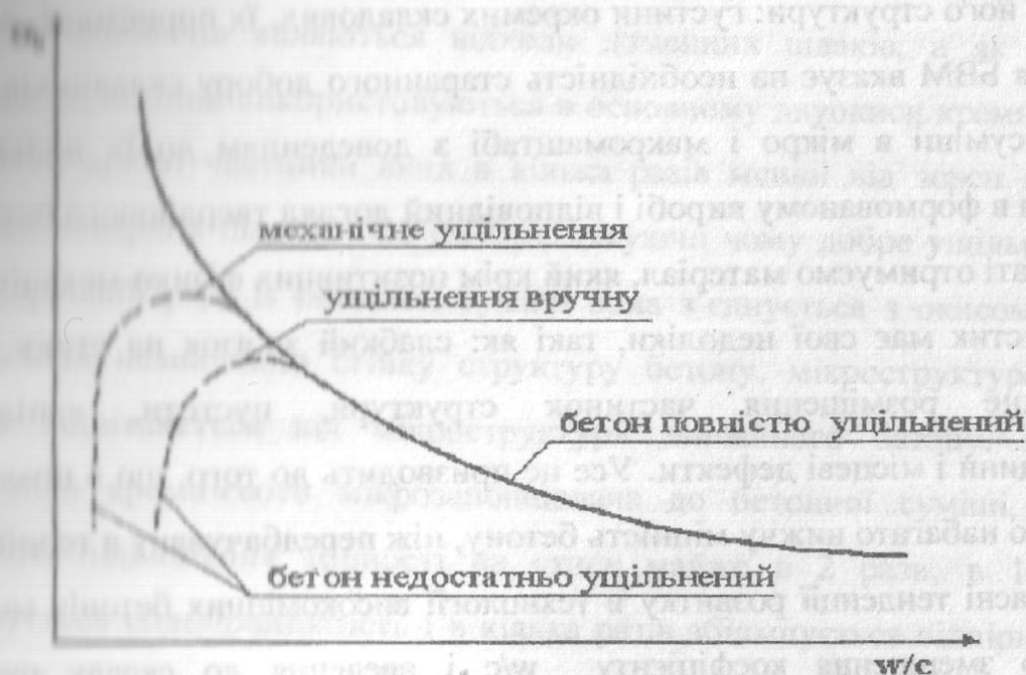


Рис. 3. Залежність міцності бетону від w/c.

Для отримання бетону високої міцності, з технологічної точки зору, слід знайти правильну залежність між структурою, тобто - добром складових до суміші, параметрами процесу виготовлення і умовами перебігу в'язання і тверднення цементного тіста, що в результаті характеризують якість, довговічність і споживацькі 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 такій самій технологічній обробці в результаті призводить до зміни споживацьких характеристик. Тому, сучасна технологія бетону в дослідках приділяє велику увагу визначенню взаємозалежності між структурою бетону і його характеристиками міцності.

Класична технологія бетону у залежності від показника w/c , проценту гідратації цементу, пористості бетону і деяких елементів його структури: густина окремих складових, їх пористості, а для отримання БВМ вказує на необхідність старанного добору складників для бетонної суміші в мікро і макроштабі 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, капіляри, мікротріщини і місцеві дефекти. Усе це призводить до того, що в практиці отримуємо набагато нижчу міцність бетону, ніж передбачувано в теорії.

Сучасні тенденції розвитку в технології високоміцних бетонів можна звести до зменшення коефіцієнту w/c і введення до складу суміші мінеральних і хімічних домішок з застосуванням інтенсивної техніки ущільнення.

Хімічні домішки використовувалися на протязі багатьох років, що дозволяло отримувати бетони з необхідними характеристиками, такими як: підвищена стійкість на вплив агресивних середовищ, промінювання, температури. Істотним кроком було застосування суперпластифікаторів і мікрозаповнювачів, а передовсім - кремнієвих. 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 B150 [1].

Додавання кремнієвих мікрозаповнювачів призводить до кращого зчеплення і заповнення в структурі кришиво - розчин і отримується бажаний з погляду міцності приріст продуктів гідратації типу C-S-H, а

також зміни в зразку кількості, розміру, одиничного об'єму і вигляду еліпсоїдних порот[6]. В практиці джерелом отримання кремнієвих мікрозаповнювачів являються відходи доменних шлаків, а як активна добавка до бетонів використовуються в основному двоокиси кремнію SiO_2 (87-98%), дрібні частинки яких в кілька разів менші від зерен цементу (площа поверхня біля 20 000 $\text{cm}^2/\text{гр}$), дякуючи чому добре ущільнюється його зерновий ряд. В бетонній суміші вона з'єднується з окисом вапна, утворюючи незвичайно стійку структуру бетону, мікроструктура якого значно відрізняється від мікроструктури звичайного бетону. Завдяки додаванню кремнієвого мікрозаповнювача до бетонної суміші, можна отримати підвищення міцності на стиск майже в 2 рази, в 10 разів зменшується водопроникність і в кілька разів збільшується відпирність на стирання, вплив морозу, хлору і сірки [1].

В останні роки бетони класу В140 знайшли широке застосування при будівництві об'єктів в таких високорозвинених країнах як США, Японія, Норвегія. Але не зважаючи на це, лише деякі країни ввели формальні зміни в будівельних нормах і прийняли до застосування бетони вищої міцності на стиск ніж В60, що в деякій мірі затримує їх широке впровадження в будівництво. Бетони високої міцності являються просто необхідні при зведенні підземних і багатоповерхових об'єктів, виготовленні попередньо напружених залізобетонних конструкцій з економним перерізом.

Слід звернути особливу увагу на те, що при виготовленні і проектуванні бетонів високої міцності велике значення має кількість і якість застосовуваного цементу. В США, наприклад, при виконанні бетонів класу 140>В>85 використовуються портландцементи прийняті діючими нормами, тоді як в ФРН лише в лабораторних умовах досліджено бетони на нормативному портландцементі С45 і С55 в кількості 450 $\text{кг}/\text{м}^3$, отримавши в результаті бетон міцності $R_{28} > 85$ МПа. Деякі науковці з

Данії, для отримання бетону В100 пропонують застосовувати спеціальний цементний розчин DSP, міцність на стиск якого становить 350-400 МПа і є вищою від міцності більшості кришив. Даний розчин має в своєму складі кремнієвий пил, зерна якого в кільканадцять разів менші від зерен цементу, і виконує дві функції: заповнює мікропустоти і майже повністю зв'язує вуглекис вапна. Це разом з інтенсивним вимішуванням з малою кількістю води ($w/c = 0,12$ до $0,20$) дає в результаті однорідну і дуже щільну структуру. Також цей розчин характеризується малою кількістю повітряних пустот і капілярів, а величина усадки значно менша, дякуючи утворенню продуктів гідратації, зменшенню кількості води, однорідності структури і високій міцності. Іншим відомим методом підвищення міцності цементного розчину є застосування полімерів, які зменшують тертя між твердими частинками, що значно покращує ущільнення бетону [1].

Слід зауважити, що границя міцності бетонів на стиск в значній мірі залежить від використаних 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 чому 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 [6].

Результати дослідів *Blicka* [7] і *Cordona* [8] свідчать, що оптимальна міцність бетону на стиск при великій кількості цементу і низькому

повітряному w/e отримується при застосуванні дрібного кришива розміру 9,3-12,7 мм, а максимальний розмір зерен не повинен перевищувати 19...25,4 мм. *Alexander* [9] в 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) розміру 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 скоріше з огляду на зменшення водопотреби, ніж для заповнення міжзернових порот. Головною умовою використання дрібного і крупного заповнювачів при виготовленні бетонів високої міцності є усунення пилюватих фракцій і глини, передовсім на поверхні зерен. Не рекомендується застосовувати піску з нерівномірним зерновим складом, а форма зерен повинна бути максимально наближена до форми кубу - видовжені і плоскі зерна слід взагалі усунути. Рекомендується застосування кришива ламаного, що дозволяє збільшити його робочу поверхню і покращує причепність між цементним розчином і заповнювачем [4].

Не можна залишити без уваги вплив цементів на міцність бетону. В випадку БВМ кількість цементу повинна знаходитись в межах 350-450 $\text{кг}/\text{м}^3$ і не менше ніж 320 $\text{кг}/\text{м}^3$ при додаванні кремнієвого пилу. Слід дотримуватись оптимального варіанту – кількість цементу повинна відповідати утворенню правильної структури продуктів гідратації, особливо їх "твердої" фази і заповнити пустоти між зернами кришив і заповнювачів, забезпечуючи потрібну реологічну структуру бетонній суміші.

Тверднення цементу є процесом складним і багатостороннім, а керування ним вимагає розуміння багатьох явищ з розділу фізикохімії, термодинаміки та реології. Велика кількість взаємозалежних процесів:

розчинення, кристалізації, хімічних реакцій, поширення фази твердої, рідкої, газоподібної, теплоутворення, дифузії – обумовлюють синтез матеріалу складної структури. Експлуатаційні властивості твердіючого цементу: міцність, довговічність і морозостійкість в великій мірі залежать від процесу гідратації цементу. Знання умов цих процесів, одночасно з поглядом якості і кількості, дозволяє керувати в значній мірі процесом тверднення для отримання структури з необхідними властивостями.

До головних факторів, які відповідають за міцність цементу, належать:

- фазовий склад клінкеру і його кристалохімічна активність,
- ступінь роздрібнення цементу,
- домішки для прискорення процесу тверднення,
- умови процесу гідратації.

Приріст міцності цементу в великій мірі залежить від ступені роздрібнення. Кількість продуктів гідратації, що утворюються на першому етапі тверднення, залежить від розміру поверхні твердої фази, яка реагує з рідкою фазою. Одночасно, з розвитком гідратації швидкість перебігу реакції зменшується, причиною чого є утворення довкола зерен цементу плівки, яка затруднює доступ води до сухих зерен. Тому зріст роздрібнення цементу призводить до зросту початкової міцності бетону. Зміна фазового складу клінкеру в сторону підвищення кількості беліту, а також введення активних добавок і інших ніж гіпс регуляторів тужавіння, може призвести до зовсім іншої залежності міцності цементу від ступеня його подрібнення [2].

Підсумовуючи, необхідно відмітити, що проблематика виготовлення і застосування бетонів високої міцності є досить складною і обширною, порушує багато нерозв'язаних і недостатньо досліджених проблем як теоретичних так і розрахункових. Як приклад, можна навести недосліджені питання роботи високоміцних бетонів під впливом динамічних і термічних навантажень, міцність при скручуванні, пробитті, зрізі а також причепність

на арматурної сталі. З огляду на брак нормативних документів застосування бетонів високої міцності вимагає виконання індивідуальних аналізів і досліджень. Усі експлуатаційні аспекти повинні розглядатися з точки зору значно довшого часу експлуатації будівельних об'єктів і конструкцій. Широке впровадження, використання і розвиток високоталесних бетонів в високорозвинених західних країнах вказує на значну вигоду від застосування.

Література

1. P. Seabrook // Discussion of papers on physical and chemical causes of deterioration of concrete in seawater. // Proc. Symp. Ind. University of California Berkeley, - 1989. - S.73-74.
2. Malier Y, // The French approach to using HPC Concrete International. - 1991. - May. - S.45-46.
3. Thornton Ch.H. Tomasetti R.I. // The world Tall Building - The Miglin Heitler Tower, Chicago, Illinois. - IV-th World Congress of Tall Building, Proceeding, - Hong Kong - 1991 - S.63-66.
4. Les Betons a hautes performances, Du materiau a l'ouvrages sous la direction de Yves Malier. - Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussees. - 1990. - Paris - S.12-15.
5. D. Pomeroy // Concrete durability: from basic research to practical reality. - Edited J. M. Scanlan. - ACJ SP-100. - 1987. - S.111-130.
6. Kucharska I. // Kształtowanie struktury wysokosprawnych betonów. // Rola dodatków i domieszek. - Przegląd Budowlany. - 1992. - No 9-8. - S.154-156.