



Саницький М.А.



Марущак У.Д.



Кіракевич І.І.



Стечишин М.С.

**Саницький М.А., доктор техн. наук, професор,
Марущак У.Д., канд. техн. наук, доцент,
Кіракевич І.І., канд. техн. наук,
Стечишин М.С., аспірант,
Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна**

ВИСОКОМІЦНІ САМОУЩІЛЬНЮВАЛЬНІ БЕТОНИ НА ОСНОВІ ДИСПЕРСНО-АРМОВАНИХ ЦЕМЕНТУЮЧИХ СИСТЕМ

У статті показано можливість підвищення тріщиностійкості високоміцних самоущільнювальних бетонів шляхом дисперсного армування та модифікування структури на мікрорівні (рівень цементної матриці) і макрорівні (мезоструктура цементного бетону). Представлено особливості формування фазового складу та мікроструктури дисперсно-армованих цементуючих систем.

У сучасному інноваційному будівництві постійно розширюється використання бетонів, одержаних з самоущільнювальних бетонних сумішей (Self-Compacting Concrete – SCC), особливістю яких є здатність ущільнюватися без механічного впливу, заповнювати форми під дією власної ваги без вібрації і сегрегації при самочинному видаленні повітря, в т.ч. в густоармованих конструкціях, що передбачає максимальне уникнення трудомістких, енергозатратних операцій їх вкладання та ущільнення, а також забезпечення високої якості поверхні конструкції після розпалублення. В той же час, складність проектування самоущільнювального бетону полягає в забезпеченні як високих технологічних властивостей бетонних сумішей, так і необхідних експлуатаційних характеристик затверділих бетонів на їх основі. При цьому пріоритетною вимогою є покращені реологічні показники бетонної суміші – рухливість, в'язкість, сегрегація, нівелювання у густоармованих конструкціях, видалення захопленого повітря, що зумовлює багатокomпонентність складів самоущільнювальних бетонів з використанням хімічних та мінеральних добавок, мікронаповнювачів, поліфракційних заповнювачів [1-3].

Основне навантаження у формуванні властивостей конструкційних матеріалів нового покоління несе цементуюча матриця, що утворюється за рахунок процесів конденсації мінеральних дисперсних систем різної хімічної природи. Виявлення нових характеристик складових таких систем на рівні нано- і мікроструктури, а також поведінки системи на рівні коагуляційних явищ дозволяє забезпечити тверднення цементуючої матриці будівельних композитів з урахуванням можливостей модифікування в напрямку покращення їх властивостей. Одержання щільної структури самоущільнювального бетону на мікрорівні досягається наступними ефектами: високою щільністю упакування зерен цементуючої системи за рахунок використання дрібнодисперсних композицій (фізична оптимізація); пуцолановою реакцією при використанні активних мінеральних добавок (хімічна оптимізація); збільшенням зчеплення між цементною матрицею та заповнювачем (оптимізація мезоструктури бетону) [3, 4].

Значимість і перспективність використання високоміцних самоущільнювальних бетонів визначається їх основною пере-

вагою – підвищенням несучої здатності будівельних конструкцій, що працюють на стиск (колони, опори, несучі елементи будівель і споруд тощо). Разом з тим, специфіка складів таких самоущільнювальних бетонів зумовлює певні особливості будівельно-технічних характеристик затверділого композиту. Так, згідно даних Г.В. Несветаєва [5] за рахунок зміни макроструктури бетону (збільшення кількості цементного каменю та зменшення крупного заповнювача) і впливу суперпластифікатора деформації усадки самоущільнювального бетону дещо збільшуються, а початковий модуль пружності зменшується порівняно з показниками бетонів однакового класу, одержаних за традиційною технологією. Особливістю високоміцних бетонів є їх низька ударна міцність, зростаюча чутливість до тріщиноутворення та крихкості, що проявляється в зниженні пластичних деформацій у бетоні під навантаженням. У результаті цього високоміцний бетон при граничних навантаженнях руйнується практично миттєво, що представляє загрозу безпечної експлуатації і надійності будівель та споруд при перевищенні розрахункових навантажень в стиснутих елементах.

Протидія руйнуванню та забезпечення ефективної роботи будівельних конструкційних матеріалів у процесі експлуатації визначається не тільки їх підвищеною міцністю, але й низькою крихкістю – здатністю їх структури перешкоджати утворенню, росту та поширенню тріщин [6]. На сучасному етапі розвитку науки про бетон за рахунок керованого структуроутворення створюється можливість розроблення матеріалу із необхідними властивостями на основі розкриття взаємозв'язків у системі «склад – структура – властивості матеріалу». Модифікування і вдосконалення структури бетону досягається шляхом комплексної системної хімізації складу, введенням нових структурних елементів, що блокують розвиток тріщин в бетоні, зокрема в'язкопластичних компонентів, дисперсних армувальних волокон та ін.

Для отримання дисперсно-армованих бетонів використовують сталеві, мінеральні, вуглецеві, поліпропіленові та інші види волокон. Дисперсне армування бетону розглядається як ефективний спосіб підвищення його міцності на розтяг, ударної міцності, опору кавітації, водонепроникності,

довговічності, тріщиностійкості, скорочення обсягів традиційних арматурних робіт, зменшення загальної маси конструкцій. Слід відзначити, що при традиційному дисперсному армуванні вирішується задача гальмування тріщин тільки одного структурного рівня, в той час як ієрархія тріщиноутворення та сукупності тріщин свідчить про присутність у бетоні дефектів різних розмірів і належність їх до відповідного масштабного рівня структури матеріалу – нано-, ультрамікро-, субмікро-, мікро-, мезо- та макрорівня. Тому проблема отримання високоміцного дисперсно-армованого бетону з покращеними експлуатаційними властивостями вирішується шляхом багаторівневого модифікування його структури добавками різного функціонального призначення в поєднанні з армувальними волокнами [7, 8]. На макромасштабному рівні армувальними елементами є мінеральні або штучні волокна зі співвідношенням $l/d \gg 1$ (l – довжина, d – діаметр частинки добавки), а на мікромасштабному рівні (цементуюча матриця) – вискодисперсні мінеральні добавки, для яких $l/d \approx 1$. Ефективним на рівні цементуючої матриці є армування голчасто-волокнистими кристалами еtringіту, що утворюються безпосередньо при гідратації цементу, в результаті чого відбувається явище «самоармування» на мікроструктурному рівні [9]. При цьому значний практичний інтерес для синтезу еtringіту в цементуючій матриці представляє використання добавки метакаоліну [10].

Метою роботи є розроблення самоармованих суперпластифікованих цементуючих систем «портландцементний клінкер – двоводний гіпс – активні мінеральні добавки – мікронаповнювачі – суперпластифікатор – солі лужних металів», що дозволяє направлено керувати технологічністю та кінетикою структуроутворення, інтенсифікувати початкові стадії тверднення та створити особливо міцну і монолітну структуру затверділого бетону, а також оптимізація складів самоущільнювальних бетонів, армованих базальтовим волокном, за критеріями легковкладальності та міцності.

Для приготування армованих самоущільнювальних бетонів при проведенні експериментальних досліджень використовували портландцементи ПЦ І-500-Н ПАТ «Івано-Франківськцемент» та ПАТ «Волиньцемент»; на їх основі розробляли самоармовані суперпластифіковані цементуючі системи, що містять золу-винесення, вапняковий мікронаповнювач, суперпластифікатор полікарбоксилатного типу (ПК) та прискорювачі тверднення. При цьому дисперсне армування цементуючої системи на мікрорівні проводили органо-мінеральними добавками, до складу яких входить комплексна сульфат-алюмінатна добавка (КСАД) на основі високоактивного метакаоліну і двоводного гіпсу.

Армувальним елементом на макромасштабному рівні (мезорівень цементного бетону) використано базальтову фібру РБР-18-т10/24 ТзОВ «Технобазальт-Інвест» (м. Київ) довжиною волокна 24 мм, діаметром 18 мкм, виготовлену з базальтового ровінгу за ТУ У В.2.7-26.8-34323267-002:2009, до технічних переваг використання якої належить забезпечення тримірному армування суміші, збільшення міцності бетону на стиск та розтяг при згині, стійкості до стирання, підвищення водонепроникності та морозостійкості.

Як дрібний заповнювач до самоущільнювального бетону використовували кварцовий пісок Жовківського родовища ($M_k=1,8$), в якості крупного заповнювача – гранітний щебінь фракції 5-20 мм. В якості прискорювачів тверднення застосовували солі лужних металів (тіосульфат натрію та ін.)

Технологічні та будівельно-технічні властивості бетонів на основі армованих суперпластифікованих цементуючих систем визначали згідно спеціальних методів

оцінки якості, рекомендованих європейською комісією з самоущільнювального бетону (EFRAKC), діючих стандартів та загальноприйнятих методик. Вивчення особливостей процесів гідратації армованих суперпластифікованих цементуючих систем проводили за допомогою рентгенофазового аналізу (дифрактометр ДРОН-4.0) та растрової електронної мікроскопії (PEM 106 И з мікрозондовим рентгеноспектральним аналізатором).

Цементуюча система «портландцемент ПЦ І-500-Н – комплексна сульфат-алюмінатна добавка – зола-винесення – вапняковий мікронаповнювач – суперпластифікатор полікарбоксилатного типу – прискорювачі тверднення» характеризується розпливом конуса $PK=180$ мм (ДСТУ Б В.2.7-187:2009) і її можна віднести до суперпластифікованих, що створює можливість отримання легковкладальних та самоущільнювальних сумішей на їх основі [11]. При випробуванні цементуючої системи згідно ДСТУ Б В.2.7-187:2009 в умовах підвищеної рухливості досягається зростання в 1,4 рази ранньої міцності та приріст міцності на стиск через 28 діб тверднення на 12 % (рис. 1, а). В той же час, за рахунок суттєвого водоредуруючого ефекту ($\Delta B/C=23,1$ %, $PK=110$ мм) досягається висока рання міцність ($R_{ct}^2/R_{ct}^{28}=0,69$), яка відповідає стандартній міцності ПЦ І-500-Н. Активність цементуючої системи становить $R_{ct}^{28}=72,5$ МПа, що визначає технічний ефект та створює можливість одержання швидкотверднучого високоміцного в'язучого. Міцність на згин цементуючої системи у ранньому віці в умовах підвищеної рухливості зростає на 30-32 %, а через 28 діб – на 10 % порівняно з ПЦ І-500-Н.

При випробуванні згідно з EN 196 ($B/C=0,50$) міцність на стиск розроблених цементуючих систем через 2 доби зростає на 43,9 % порівняно з ПЦ І-500-Н при забезпеченні пластифікуючого ефекту $\Delta PK=96,9$ % (рис. 1, б), міцність на згин при цьому зростає на 24 %. За рахунок зниження водовмісту від 0,50 до 0,41 ($PK=160-165$ мм) досягається зростання марочної міцності цементуючої системи до 79,5 МПа. Технічний ефект при випробуванні рівнорухливих цементуючої системи ($B/C=0,41$) та портландцементу ПЦ І-500-Н ($B/C=0,50$) складає $\Delta R_{ct}^{28}=44$ %.

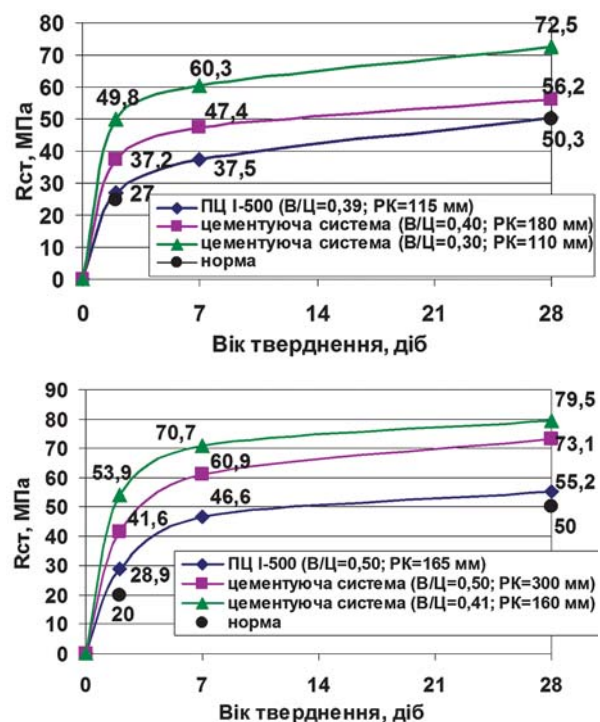


Рис. 1. Міцність на стиск портландцементу ПЦ І-500-Н та самоармованих цементуючих систем при випробуванні згідно з ДСТУ Б В. 2.7-187-2009 (а) та EN 196 (б)

За відношенням значень міцності на згин до показників міцності на стиск самоармованої суперпластифікованої цементуючої системи розраховано коефіцієнти крихкості в різні періоди тверднення. Слід відзначити, що в період 7-28 діб приріст міцності на згин відбувається повільніше порівняно з міцністю на стиск, тому коефіцієнти крихкості цементуючих систем дещо зменшуються з часом тверднення. В той же час, через 28 діб тверднення їх значення перевищують 0,125, що дозволяє класифікувати дані цементуючі системи як некрихкі. Так, у ранній період тверднення для ПЦ І-500-Н значення коефіцієнтів крихкості самоармованих цементуючих систем має більш пологий характер, а їх зниження складає 2-7 %. Це свідчить, що використання комплексної сульфат-алюмінатної мінеральної добавки та солей лужних металів у складі суперпластифікованих цементуючих систем забезпечує прискорене наростання міцності на стиск як за рахунок «ефекту мікронаповнювача», так і ущільнення каменю завдяки утворенню додаткової кількості гідратних фаз в неклінкерній частині цементуючої системи, а підвищення міцності на згин досягається за рахунок ефекту самоармування кристалогідратами еtringіту, які характеризуються голчастим габітусом. У кінцевому результаті це призводить до зростання коефіцієнта крихкості цементуючої системи порівняно з ПЦ І-500-Н.

Для вивчення особливостей процесів гідратації в неклінкерній частині цементуючої системи досліджено фазовий склад та мікроструктуру модельної системи «СаО : КСАД» (В/Т=1). За даними рентгенофазового аналізу (рис. 2, а) через 7 діб тверднення в нормальних умовах на дифрактограмах зразків досліджуваної системи спостерігаються лінії продуктів взаємодії – еtringіту ($d/n=0,973$; $0,561$ нм та ін.), гексагональних гідроалюмінатів кальцію типу C_4AH_{13} ($d/n=0,810$; $0,395$ нм та ін.), що свідчить про активну фазоутворюючу роль метаклаоліну в системі з гідроксидом та сульфатом кальцію. Через 28 діб інтенсивність ліній $Ca(OH)_2$ зменшується за рахунок зв'язування його актив-

ними мінеральними компонентами КСАД, при цьому закономірно зростають лінії еtringіту. З часом тверднення (через 180 діб) на дифрактограмах модельної системи спостерігається збільшення інтенсивності ліній еtringіту, який в даних модельних системах утворюється без участі клінкерного мінералу $3CaO \cdot Al_2O_3$ за рахунок взаємодії активного Al_2O_3 метаклаоліну з гідроксидом та сульфатом кальцію.

Для мікроструктури досліджуваної системи в ранньому віці характерна значна гетерогенність з наявністю пластинчастих кристалів гідроксиду кальцію та незначної кількості гексагональних гідроалюмінатів кальцію (рис. 2, б). Через 28 діб тверднення зростає кількість гелеподібних фаз, при цьому притаманним є утворення дрібнокристалічного волокнистоподібного еtringіту. При подальшому твердненні до 180 діб вміст портландиту зменшується, проте зростає кількість голчастих кристалів еtringіту, які відіграють армувальну роль і сприяють ущільненню міжзернового простору штучного каменю. На спектрі рентгенівського випромінювання продуктів гідратації модельної системи (рис. 2, в) спостерігаються основні характеристичні лінії Ca, Si, Al, S, O, що підтверджує утворення в даній модельній системі гідросилікатів, гідроалюмінатів кальцію та еtringіту.

Аналіз формування мікроструктури свідчить, що використання самоармованих на мікроструктурному рівні цементуючих систем забезпечує прискорення гідратаційних процесів, ущільнення неклінкерної частини цементної матриці за рахунок утворення голчастих кристалів еtringіту і кольматції пор гексагональними кристалами портландиту, гідроалюмінатів та гідрокрбоалюмінатів кальцію. Це зумовлює перерозподіл пористості та зростання міцності і тріщиностійкості цементуючої матриці. Для високопластичного тіста на основі ПЦ І-500-Н розплив циліндра Суттарда $R_C=400$ мм досягається при В/Ц=0,60, при цьому загальна пористість каменю становить 36,5 % (відкрита – 14,7 %, закрита – 21,8 %). В той же час, аналогічна рухливість самоармованої суперпластифікованої швидкотверд-

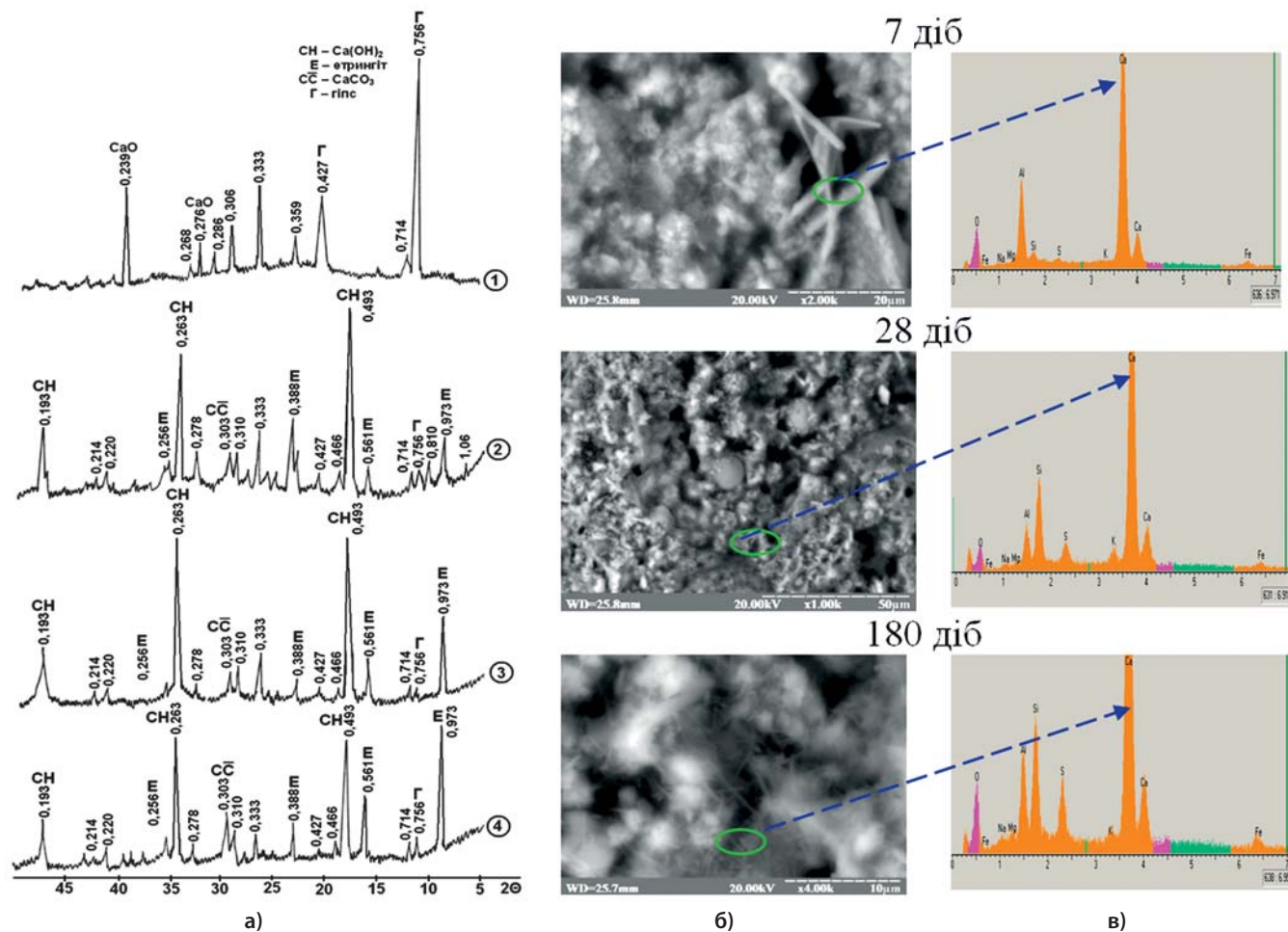


Рис. 2. Дифрактограми (а), мікроструктура (б) та спектр рентгенівського характеристичного випромінювання (в) каменю на основі модельної системи «СаО : КСАД = 1 : 1»: 1 – негідратованої; 2-4 – гідратованої в нормальних умовах 7, 28 та 180 діб відповідно

нучої цементуючої системи досягається при $V/C=0,30$, при цьому пористість каменю зменшується до 26,7 %, а співвідношення між відкритою та закритою пористістю змінюється до 4,3 та 22,4 % відповідно.

Проектування складів дисперсно-армованих на різних рівнях структури самоущільнювальних бетонів проведено методом ортогонально-центрального композиційного планування. Ступінь армування базальтовим волокном становив $p=0,5$ мас.%. Встановлено, що введення базальтових волокон в бетонну суміш дещо знижує її рухливість; це вимагає збільшення витрати пластифікатора, а також дрібнодисперсної фази за рахунок введення активних мінеральних добавок, при оптимальній кількості яких досягається максимально щільне упакування частинок. Збільшення вмісту тонкодисперсних мінеральних добавок понад оптимальну кількість призводить до розбавлення цементної системи, руйнування безпосередніх контактів між частинками портландцементу і зменшення міцності. Розчинова суміш на основі дисперсно-армованої цементуючої системи «портландцемент – активні мінеральні добавки – мікронаповнювачі – суперпластифікатор полікарбоксилатного типу – базальтова фібра» характеризується розпливом конуса $R_K=300$ мм і відноситься до суперпластифікованих.

Аналіз отриманих математичних залежностей дозволяє визначити оптимальний склад високоміцного самоущільнювального бетону на основі армованих цементуючих систем за критеріями легковкладальності та міцності [12]. При верифікації оптимального складу бетону ($C:P:Ш=1:1,52:2,04$; $C=480$ кг/м³) одержали наступні характеристики бетонної суміші: клас розпливу SF3 (діаметр розпливу 780 мм), клас в'язкості VS2 ($T_{500}=6$ с), об'єм втягнутого повітря 0,35 %. Багаторівневе армування цементуючих систем за рахунок як явища «самоармування» на субмікромасштабному рівні структури, так і армування базальтовим волокном на рівні мезоструктури дозволяє одержати високоміцні самоущільнювальні бетони, що характеризуються підвищеною щільністю (середня густина становить 2400-2425 кг/м³, водопоглинання $W_m=2,2$ %). Міцність таких самоущільнювальних бетонів на основі армованих цементуючих систем через 2 та 28 діб становить 57,1 і 104,5 МПа відповідно, а через 56 діб – 113 МПа (рис. 3). Розроблені дисперсно-армовані високоміцні самоущільнювальні бетони характеризуються також швид-

ким наростанням міцності ($R_{cr^2}/R_{cr^{28}}=0,55>0,50$) згідно з ДСТУ Б В.2.7-176:2008. При армуванні базальтовою фіброю коефіцієнт конструктивної якості (ККЯ) самоущільнювальних бетонів зростає від 41,9 до 43,4 МПа.

Дослідженнями деформативних властивостей фіброармованих самоущільнювальних бетонів встановлено, що в межах вимірюваних деформацій практично відсутнє збільшення відносних поздовжніх та поперечних деформацій швидконапливаючої повзучості, що характерне для високоміцних бетонів. При введенні базальтової фібри модуль пружності високоміцного самоущільнювального бетону зростає від 51,6 до 63,9 ГПа, а коефіцієнт Пуассона знижується від 0,19 до 0,17. Призма міцність високоміцного самоущільнювального бетону становить 71,7 МПа, а при додатковому армуванні базальтовою фіброю збільшується до 96,2 МПа.

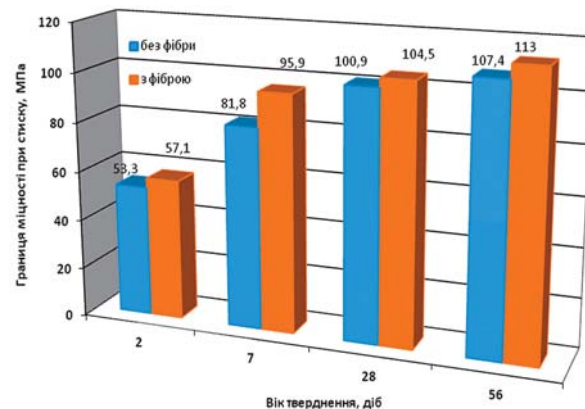


Рис. 3. Міцність самоущільнювальних бетонів на основі армованих суперпластифікованих цементуючих систем

Таким чином, дисперсне армування та модифікування структури на мікрорівні (рівень цементної матриці) і макрорівні (мезоструктура цементного бетону) є ефективним засобом отримання високоміцних самоущільнювальних бетонів на основі суперпластифікованих цементуючих систем при безвібраційній технології бетонування з широкими функціональними можливостями для застосування в умовах, що вимагають підвищеної тріщиностійкості, міцності на стиск і згин, високої ударної в'язкості.

Література:

1. Пути создания самоуплотняющихся бетонов / С.В. Коваль, Д.М. Поляков, М. Ситарски, М. Циак // Будівельні конструкції. – К.: НДІБК, 2009. – Вип. № 72. – С. 232-238.
2. Дорофеев В.С., Барабаш И.В., Быстревский К.С. Самоуплотняющийся бетон с добавкой молотого гидратированного цемента на механоактивированном вяжущем // Будівельні матеріали та вироб. – 2013. – №5. – С. 30-31.
3. J. Szwabowski, J. Golaszewski. Technologia betonu samozagęszczalnego // Kraków : Stowarzyszenie Producentów Cementu, 2010. – 160 s.
4. Рунова Р.Ф., Пряншніков О.В. Аналіз ефективності використання в'язучих із мінеральними добавками в бетонних масивах // Будівництво України. – 2008. – №2. – С.18-21.
5. Несветаев Г.В. О методологии оценки эффективности добавок для самоуплотняющихся бетонов // Современные бетоны: Міжнар. наук.-практ. конф. – Запоріжжя : «Будіндустрія ЛТД», 2008. – С. 111-118.
6. Солодкий С.Й. Тріщиностійкість бетонів на модифікованих цементах. – Львів : Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2008. – 144 с.

7. Рабинович Ф.Н. Композиты на основе дисперсноармированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции. – М. : АВС, 2004. – 560 с.
8. Коротких Д.Н. Дисперсное армирование структуры бетона при многоуровневом трещинообразовании // Строительные материалы. – 2011. – № 3. – С. 96-99.
9. Тимашев В.В., Сычева Л.И., Никонова Н.С. К вопросу о самоармировании цементного камня // Труды МХТИ им. Д.И. Менделеева. – М., 1976. – Вып. 92. – С. 155-156.
10. Метаксаолін в будівельних розчинах і бетонах / Л.Й. Дворкін, Н.В. Лушнікова, Р.Ф. Рунова, В.В. Троян. – К. : Вид-во КНУБіА, 2007. – 216 с.
11. Самоущільнювальні бетони зі швидким наростанням міцності / І.І. Кіракевич, У.Д. Марущак, М.А. Саницький, М.С. Стечишин // Теорія і практика будівництва : Вісник НУЛП. – Львів, 2012. – № 737. – С. 153-158.
12. Стечишин М.С., Шевчук Г.Я., Гнип О.П. Розробка високофункціональних самоущільнювальних бетонів, армованих базальтовим волокном // Вісник ОДАБА. – Одеса, 2013. – С. 237-242.