

СТРУКТУРНЕ РІЗНОМАНІТТЯ ТА ВЛАСТИВОСТІ БЕТОНІВ ПРИ ТРИВАЛОМУ ТВЕРДІННІ

STRUCTURAL DIVERSITY AND PROPERTIES OF CONCRETES AT LONG-TIME HARDENING

Коробко О.О., д.т.н., доц., **Вировой В.М.**, д.т.н., проф., **Закорчемный Ю.О.**, к.т.н., доц., **Кушнір О.М.**, к.т.н., доц. (Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса)

Korobko O. O., doctor of technical sciences, docent, **Vyrovoy V.M.**, doctor of technical sciences, professor, **Zakorchemny Yu. O.**, candidate of technical sciences, docent, **Kushnir O.M.**, candidate of technical sciences, docent (Odessa State Academy Civil Engineering and Architecture, Odessa)

Підвищити стійкість бетонів при тривалому твердінні можна за рахунок направленої організації початкової структури на макрорівні шляхом збільшення різноманіття умов взаємодії на границях розділу між матричним матеріалом та заповнювачами.

The potential possibility of increasing the level of mechanical properties of composites on mineral binders remains during the long period. The initial structures hereditarily determine the change of the properties of the finished material in time. It can be assumed that an increase in the structural diversity of concretes should lead to such the organization of a structure that will guarantee the preservation or increase of the level of quality indicators at long terms of hardening (up to 720 days). The conducted researches showed that concrete of long hardening with the structure organized at selective adhesion of a cement matrix to the surface of dense or porous aggregates differed are more resistant to external influences. That is, those concretes, organization of structure which happened under the conditions of diversity of interphase interactions at the level of a macrostructure. This was ensured by the use of aggregates with various condition of a surface. The directed change of a ratios of adhesive-cohesive bonding forces at the surfaces of partition between a cement part and the surface of an aggregates provided structures, which caused increase the compressive strength of concrete by 18% and the module of elasticity by 24% at reducing the water by 29-36% and the open capillary pore volume by 44%. The structure of concrete organized at selective adhesion was the densest in comparison with of concrete of other structures. At the same time, the damage of material by technological cracks and inner surfaces of partition has grown more for concrete, the structure of which was

provided by a variety of conditions of interactions between the cement matrix and aggregates. Favourable change of the parameters of these elements, along with the processes of hydration of relict binder grains, causes an improvement in time of indicators of the mechanical and deformative properties of concrete. Thus, structural diversity determines the potential changes of the concrete structure at long-hardening that must be taken into account at designing compositions and technology of the concrete, intended for difficult operating conditions.

Ключові слова: бетон, керамзитобетон, структура, організація, поверхні розділу, пошкодженість, властивості.

Concrete, expanded clay concrete, structure, organization, surfaces of section, damage, properties.

Вступ. Концепція «життєвого циклу» конструкцій, будівель та споруд базується на певних вимогах. По-перше, має проводитися оцінка споживчої вартості будівельних об'єктів у залежності від забезпечення потрібного рівня фізико-технічних властивостей бетонів, з урахуванням вирішення задач зниження їх матеріалоемності. По-друге, слід звертати увагу на виконання закладених у матеріал функцій протягом нормованого часу експлуатації конструкцій та виробів. В роботах [1, 2] показано, що властивості бетонів на рівні мікро- та макроструктурних неоднорідностей при тривалому твердінні визначаються організацією початкових структур. Це дає можливість поліпшити показники якості цементного каменя і бетону в часі за рахунок направленої отримання складових, характерних для того чи іншого структурного рівня. Для цього застосовують різні фактори керування структуроутворенням будівельних композитів. Ефективним способом одержувати задані набори початкових структур на макрорівні є зміна співвідношення адгезійно-когезійних сил зв'язку на границях розділу між матричним матеріалом та заповнювачами. Проведені раніше дослідження показали [3], що забезпечення різноманіття умов взаємодії цементної матриці з поверхнею заповнювачів сприяє організації структур, що гарантують підвищення показників механічних і деформативних властивостей важкого та легкого бетонів після 28 діб твердіння. Проте, подальшого вивчення потребують питання, які пов'язані з покращенням здатності таких бетонів зберігати комплекс властивостей у часі.

Аналіз останніх досліджень. Проведений огляд науково-технічної інформації показав, що на даний момент часу не існує одного загального теоретично обґрунтованого шляху при оцінці наростання рівня механічних властивостей бетонів. Розрахунок зміни міцності бетону в часі може здійснюватися декількома методами: - по логарифмічному закону; - з використанням узагальнених експериментальних коефіцієнтів наростання

міцності; - на основі визначення впливу збільшення активності цементної складової або зниження водо-цементного відношення на темпи росту міцності бетону через його номінальну марочну міцність. Традиційно більшість досліджень присвячено вирішенню питань підвищення міцнісних характеристик бетонів у відносно ранньому віці. Враховуючи, що найбільш значні дослідження з вивчення міцності бетонів в пізні строки твердіння проведені кілька десятків років тому, виникають певні обмеження на використання їх результатів у теперішній час. Встановлені раніше кількісні співвідношення міцностей бетону на різних строках твердіння не раціонально використовувати у розрахунках без дослідної перевірки та коректування у відповідності з особливостями сучасних цементів та технології виробництва бетонів. Таким чином, важливою проблемою є накопичення експериментальних результатів по визначенню міцності бетонів на щільних та пористих заповнювачах у часі.

Постановка мети та задачі досліджень. Мета досліджень – підвищення рівня механічних та деформативних властивостей «зрілих» бетонів за рахунок направленої початкової організації макроструктури шляхом забезпечення різноманітних співвідношень адгезійно-когезійних сил зв'язку на границі розділу між цементною матрицею та поверхнею заповнювачів у бетоні одного складу.

Задачі досліджень: провести аналіз умов початкового структуроутворення бетонів на макрорівні та визначити зміну властивостей важкого бетону і керамзитобетону після тривалого твердіння.

Методика досліджень. Дослідження проводили на зразках-кубах, виготовлених з бетонної суміші на щільних і пористих заповнювачах з різним станом поверхні. Разом з традиційними складами важкого та легкого бетонів використовували склади, які містили заповнювачі, що були повністю або частково апретовані ГКР-11. Зерна гранітного щебеня та керамзитового гравію піддавали гідрофобізації шляхом занурення у розчин гідрофобізатора при концентрації 2% за масою з подальшим висушуванням при $T \leq 100^\circ\text{C}$. Це дозволило забезпечити різні умови взаємодії цементної матриці з поверхнею заповнювачів, навіть при одному й тому ж складі бетону: - $R_A > R_K$, адгезія матричного матеріалу до заповнювачів більше його когезійної міцності (бетон складу I); - $R_A < R_K$, відсутня адгезія матричної складової до поверхні заповнювачів (бетон складу II); - $R_A = R_K$, в матеріалі співіснують об'єми з досконалою та недосконалою адгезією матричного матеріалу до поверхні заповнювачів (бетон складу III). R_A – величина адгезії матриці до поверхні заповнювачів, R_K – величина когезійної міцності матричного матеріалу.

При постійній рухомості бетонної суміші, що потребувало коректування складів за значеннями водо-цементного відношення, були одержані бетони з відповідними показниками властивостей. Контролювали зміну наступних

властивостей бетону та керамзитобетону в часі: середню густину (ρ_w , кг/м³), об'єм відкритих капілярних пор (P_o , %), водопоглинання (W , %), швидкість проходження ультразвукових хвиль (U , м/с), технологічну пошкодженість (K_p , см/см²), модуль пружності (E , МПа·10⁻³) та міцність при стиску ($f_{ck.cube}$, МПа). Показники зазначених властивостей визначали за стандартними методиками.

Пошкодженість кількісно оцінювали через коефіцієнти пошкодженості:

– як співвідношення $K_p = \sum L_i / S$, см/см², де: $\sum L_i$ – сумарна протяжність технологічних тріщин і внутрішніх поверхонь розділу на виділеній поверхні зразка, см; S – фіксована площа поверхні зразка, см²;

– як співвідношення $K_{p1} = \sum L_i / L_i$, см/см, де: $\sum L_i$ – фактична довжина тріщини руйнування, см; L_i – найкоротша відстань між точками виходу фактичної тріщини руйнування на торцеві поверхні зразка, см.

Оцінку впливу віку бетонних зразків на зміну рівня їх властивостей (Q) здійснювали за відповідними коефіцієнтами: $\Delta\rho_w$, ΔP_o , ΔW , ΔU , ΔK , ΔE , ΔF , котрі визначали як: $\Delta Q = f_{ck.cube}^{720} / f_{ck.cube}^{28}$, де: ΔQ – зміна показника певної властивості бетону; Q^{720} – показник властивості бетону в віці 720 діб; Q^{28} – показник властивості бетону після 28 діб нормального твердіння.

Результати досліджень. Потенційна структура бетону починає організовуватися при остаточному розподілі вихідних компонентів після завершення формування виробу. Обмеженість прояву седиментаційних явищ в ущільненій бетонній суміші робить можливим фіксований розподіл і взаємне орієнтування заповнювачів з утворенням визначених границь розділу між ними та матрицею. Тим самим закладаються передумови для утворення характерних елементів структури матеріалу на макрорівні у вигляді своєрідно-упорядкованих чарунок. Більш раціональним підходом є моделювання бетону як набору чарунок з різними параметрами. Така модель відображує різноманіття бетону на рівні «матричний матеріал – заповнювачі». Всі процеси взаємодії матричного матеріалу та заповнювачів залежать від форми чарунок та співвідношень величин когезії розчинної частини та її адгезії до поверхні зерен щебеня чи гравію. Вироби на основі бетону промислових складів включають різноманітні сукупності чарунок за геометричними і фізичними параметрам. При цьому форма та розмір чарунок є спонтанним, проте, направлена зміна стану поверхні заповнювачів сприяє збільшенню різноманіття чарунок в бетоні одного складу.

В силу розбіжності орієнтування заповнювачів та співвідношень сил зв'язку на міжфазних поверхнях розділу в кожній чарунці є індивідуальним прояв властивостей матричного матеріалу як дискретного середовища [4]. Залежно від форми чарунок та стану поверхні заповнювачів утворюється неповторна блочна структура матричної складової. Це, в свою чергу, позначається на протяжності внутрішніх поверхонь розділу матриці в

окремих чарунках, що впливає на прояв об'ємних деформацій та строки тужавлення матеріалу в результаті зміни умов протікання реакцій гідратації.

Можна виділити ряд характерних механізмів взаємодії твердуючої матриці з частками заповнювачів [5]. При $R_A > R_K$ матричний матеріал як єдине ціле «притискається» до поверхні заповнювачів, чим зумовлюється утворення щільного контакту між ними. Це викликає флуктуації густини самої матриці, виникають різнонаправлені деформації розтягу, чим забезпечуються умови для розвитку тріщин по матеріалу в напрямку до заповнювачів. У випадку $R_A < R_K$ відбувається збільшення щільності матричної складової при відшаруванні матриці від поверхні заповнювачів. Це веде до одночасного прояву деформацій розтягу і стиску, що провокує зародження та підростання тріщин в зонах формозміни міжфазної поверхні розділу та в об'ємі матеріалу матриці в місцях виникнення градієнтів деформацій розтягу. При $R_A = R_K$ матеріал може обтискати кути заповнювачів та відшаровуватися від одних поверхонь або утворювати щільний контакт з другими поверхнями. При вибірковій адгезії матриці до заповнювачів загальна кількість флуктуацій щільності матеріалу збільшується порівняно з випадками $R_A > R_K$ та $R_A < R_K$. На міжфазній поверхні розділу виникають деформації розтягу та стиску, що провокує формування нерівномірного поля деформацій в об'ємі матричного матеріалу. Співіснування локальних ділянок матриці з різною щільністю робить можливим прояв деформацій здвигу. Це веде до утворення тріщин на границях розділу матеріалу із заповнювачами та тріщин, по різному орієнтованих в об'ємі матричної складової.

Проведенні дослідження на фізичних моделях структурних чарунок [6] дозволили визначити, що протяжність зовнішніх границь та площа матричного матеріалу може змінюватися до 39% та 35%, відповідно, в залежності від геометричних характеристик чарунок. Різні умови адгезії матриці до поверхні заповнювачів в чарунках спричинюють зміну розмірів матричної складової на 27-36% та зміну щільності матеріалу до 40%. Початкові об'ємні деформації матриці можуть відрізнятися за величиною на 10-26%, за кінетикою прояву – на 7-44%. При переході від чарунки однієї форми до чарунок інших форм строки тужавлення матеріалу змінюються на 20-150 хв. Геометричні параметри чарунок та співвідношення величин R_A і R_K на границях розділу між розчинною складовою та заповнювачами є потужним фактором управління структуроутворенням бетону на мікрорівні в ранні періоди. Таким чином, збільшення структурного різноманіття за рахунок направлено одержання складного набору початкових структур на рівні часток в'язучого шляхом зміни параметрів макроструктури забезпечує структурний та функціональний потенціал всього матеріалу. Це повинно сказатися на механічних та деформативних характеристиках бетонів у часі.

Аналіз коефіцієнтів, отриманих за експериментальними результатами, показав (табл.1), що зміна рівня властивостей бетонів на щільних і пористих заповнювачах у часі визначалася початковими структурами, забезпеченими

різними співвідношеннями сил зв'язку на границі розділу цементної матриці з поверхнею заповнювачів (R_A/R_K).

Таблиця 1

Аналіз зміни властивостей бетонів з різним станом поверхні заповнювачів при тривалому твердінні

Співвідношення R_A/R_K	Коефіцієнти оцінки зміни властивостей бетонів у часі						
	$\Delta\rho_\omega$	$\Delta\Pi_0$	ΔW	ΔU	ΔK	ΔE	ΔF
Бетон на гранітному щебені							
$R_A > R_K$	1,01	0,66	0,69	1,12	1,05	1,23	1,03
$R_A < R_K$	0,96	0,70	0,74	1,12	1,04	1,17	1,13
$R_A = R_K$	0,95	0,55	0,64	1,17	1,07	1,32	1,20
Бетон на керамзитовому гравії							
$R_A > R_K$	0,96	1,0	0,87	1,0	1,01	0,97	1,10
$R_A < R_K$	0,96	0,82	0,78	1,03	1,03	1,0	1,15
$R_A = R_K$	0,98	0,89	0,71	1,0	1,10	1,01	1,22

В умовах експерименту мінімальним зменшенням показників середньої густини у часі відзначалися бетон складу I та керамзитобетон складу III. Проте, всі види бетону зі структурою, організованою при $R_A=R_K$, мали найбільші значення ρ_ω на 28 та 720 добу твердіння. Об'єм відкритих капілярних пор в бетонах прийнятих складів у часі зменшився. Максимально показник Π_0 знизився при складі III бетону, до 44%, та при складі II керамзитобетону, до 18%. Після тривалого твердіння протягом 720 діб найменшими значеннями водопоглинання відрізнялися бетон і керамзитобетон, структура яких була ініційована в умовах вибіркової адгезії матриці до поверхні заповнювачів. Таким чином, бетони при $R_A=R_K$ є більш щільними через прийнятий інтервал часу порівняно з бетонами інших складів. Це підтверджується збереженням на початковому рівні показників швидкості проходження ультразвуку в зразках бетону і керамзитобетону. Разом з цим, пошкодженість технологічними тріщинами і внутрішніми поверхнями розділу зростає в більшій мірі для бетонів, структура яких була забезпечена різноманітним співвідношенням значень R_A і R_K .

Пошкодженість важкого бетону збільшилася при формуванні структури в умовах $R_A=R_K$ на 21% і 29%, порівняно зі структурами, організованими при $R_A < R_K$ і $R_A > R_K$, відповідно. Для керамзитобетонних зразків вибірковість адгезії матриці до поверхні заповнювачів веде до утворення структур, які забезпечують значення пошкодженості, що є меншими значень K_p керамзитобетону складу I на 39%, складу II на 19%. Розвиток магістральної тріщини повторює траєкторію експлуатаційних тріщин і внутрішніх поверхонь розділу, які накопичуються в матеріалі під дією різного виду навантажень та виникають як підростання технологічних тріщин, що

присутні в матеріалі до експлуатації [4]. Це передбачає, що геометричні параметри тріщин руйнування визначаються кількістю та рельєфом берегів спадкових тріщин і внутрішніх поверхонь розділу, орієнтованих по фронту їх руху. Значення коефіцієнта пошкодженості $K_{п1}$, через який можна оцінити протяжність тріщини руйнування, при структурі, ініційованій в умовах $R_A=R_K$, були менші на 7-18%, ніж показники $K_{п1}$ зразків зі структурою, утвореною при досконалої або відсутній адгезії матричної складової до поверхні заповнювачів.

Структурні зміни, пов'язані з підростанням та переходом тріщин у ранг внутрішніх поверхонь розділу, наряду з процесами гідратації реліктових зерен в'язучого, зумовлюють поліпшення в часі рівня механічних і деформативних властивостей бетону та керамзитобетону. При вибірковій адгезії матриці до заповнювачів утворюються структури, які забезпечують максимальне в умовах експерименту підвищення модуля пружності бетону, до 24%. Значення E для керамзитобетону підтримуються на вихідному рівні протягом тривалого твердіння. При забезпеченні різноманіття початкових умов взаємодії матричного матеріалу із заповнювачами міцність бетону при стиску зростає в часі на 16%, значення $f_{ck.cube}$ керамзитобетону збільшуються на 18%. Найбільшим приростом міцності в умовах експерименту відзначаються бетон і керамзитобетон складу III.

Висновки. Проведені дослідження та аналіз показали, що поліпшити механічні та деформативні властивості «зрілих» бетонів можна через забезпечення направленої організації початкових структур шляхом зміни співвідношень адгезійно-когезійних сил зв'язку на границі розділу між цементною матрицею та поверхнею заповнювачів. В умовах структуроутворення бетону і керамзитобетону при $R_A=R_K$ міцність бетонів при стиску підвищилася до 18%, модуль їх пружності збільшився до 24%, показники водопоглинання зменшилися до 29-36% при зменшенні величини відкритої пористості до 44%. Використання суміші заповнювачів з різним станом поверхні привела до формування структур, при яких протяжність тріщин руйнування зменшилася на 7-18% при збільшенні технологічної пошкодженості на 19-39%. Зміна пошкодженості та параметрів магістральних тріщин у часі визначається організацією структури будівельних композитів на ранніх строках структуроутворення. Таким чином, початкова структура під впливом прийнятих структуроутворюючих факторів спадково визначає структурні зміни та прояв фізико-технічних властивостей бетону і керамзитобетону при тривалому твердінні.

1. Выровой В. Н. Влияние водонасыщения на изменение скорости ультразвука в бетоне длительного твердения / В. Н. Выровой, Ю. Н. Воронов, В. А. Панасюк // Вісник НУ «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва. – Львів, 2010. – С. 104-108.

Vyrovoy V. N. Vliyaniye vodonasyshcheniya na izmeneniye skorosti ultrazvuka v betone dlitel'nogo tverdeniya / V. N. Vyrovoy. Yu. N. Voronov. V. A. Panasyuk // Visnyk

NU «L`vivs`ka politexnika». Teoriya i prakty`ka budivny`cztva. – L`viv, 2010. – S. 104-108..

2. Панасюк В. А. Анализ изменения свойств микроструктуры бетона во времени / В. А. Панасюк, В. Н. Выровой, С. В. Сильченко // Збірник наукових праць «Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди». – Рівне, 2011. – Вип. 22. – С. 120-124.

Panasyuk V. A. Analiz izmeneniya svoystv mikrostruktury betona vo vremeni / V. A. Panasyuk, V. N. Vyrovoy, S. V. Silchenko // Zbirny`k naukovy`x pracz` «Resursoekonomni materialy`, konstrukciyi, budivli ta sporudy`. – Rivne, 2011. – Vy`p. 22. – S. 120-124.

3. Коробко О.А. Свойства бетона как функция структурного разнообразия / О.А. Коробко, В.Ю. Тофанило, Е.П. Кусова, А. Э. Стус // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – Одеса. – 2015. – Вип.58. – С.198-205.

Korobko O. A. Svoystva betona kak funktsiya strukturnogo raznoobraziya / O. A. Korobko, V. Yu. Tofanilo, E. P. Kusova, A. E. Stus // Visny`k Odes`koyi derzhavnoyi akademiyi budivny`cztva ta arkhitektury`. – Odesa. – 2015. – Vy`p.58. – S.198-205.

4. Суханов В.Г. Структура материала в структуре конструкции / В.Г. Суханов, В.Н. Выровой, О.А. Коробко. – Одесса: «ПОЛИГРАФ», 2016. – 244 с.

Suhanov V. G. Struktura materiala v strukture konstrukcii / V. G. Suhanov, V. N. Vyrovoy, O. A. Korobko. – Odessa: «POLIGRAF», 2016. – 244 s.

5. Коробко О.О. Підвищення стійкості будівельних композитів при малоцикловій утомі бетону / О.О. Коробко, В.М. Вировой, Н.Ф. Уразманова Н.Ф., О.М. Непомнящий // Збірник наукових праць «Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди». – Рівне: Вид-во НУВГП. – 2018. – Вип.36. – С. 124-131.

Korobko O. O. Pidvy`shhennya stijkosti budivel`ny`x kompozy`tiv pry` malocy`klovij utomi betonu / O. O. Korobko, V. M. Vy`rovoj, N. F. Urazmanova N. F., O. M. Nepomnyashhy`j // Zbirny`k naukovy`x pracz` «Resursoekonomni materialy`, konstrukciyi, budivli ta sporudy`. – Rivne: Vy`d-vo NUVGP. – 2018. – Vy`p.36. – S. 124-131.

6. Выровой В.Н. Композиционные строительные материалы и конструкции. Структура, самоорганизация, свойства / В.Н. Выровой, В.С. Дорофеев, В.Г. Суханов. – Одесса: «ТЭС», 2010. – 169 с.

Vyrovoy V. N. Kompozicionnye stroitel'nye materialy i konstrukcii. Struktura, samoorganizaciya, svojstva / V. N. Vyrovoy, V. S. Dorofeev, V. G. Suhanov. – Odessa: «TES», 2010. – 169 s.