

БЕЗПЕЧНЕ ФУНКЦІОНУВАННЯ ВИРОБУ ЯК ФУНКЦІЯ СТРУКТУРНОГО РІЗНОМАНІТТЯ БЕТОНУ

Коробко О.О., к.т.н., доцент,
Закорчемний Ю.О., к.т.н., доцент,
Кушнір О.М., к.т.н., доцент,
Коцюрубенко О.М., асистент,
Одеська державна академія будівництва та архітектури
okskorobko71@gmail.com

Анотація. Підтримка заданого рівня механічних і деформативних властивостей при експлуатації виробу забезпечується адаптацією структури бетону. Здатність матеріалу своєчасно реагувати на вплив оточуючого середовища визначається переважно тріщинами і внутрішніми поверхнями розділу як активних елементів структури. Багатоваріантні набори цих складових можна одержувати за рахунок направленої організації структури бетону шляхом зміни співвідношення адгезійно-когезійних сил зв'язку на границі розділу між цементною матрицею та заповнювачами. Структурне різноманіття дозволяє збільшити стійкість бетону при поперемінній дії температурних і вологісних факторів, що веде до підвищення безпеки функціонування будівельних виробів в складних зовнішніх умовах.

Ключові слова: бетон, структурні зміни, пошкодженість, малоциклові впливи.

БЕЗОПАСНОЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ИЗДЕЛИЯ КАК ФУНКЦИЯ СТРУКТУРНОГО РАЗНООБРАЗИЯ БЕТОНА

Коробко О.А., к.т.н., доцент,
Закорчемный Ю.О., к.т.н., доцент,
Кушнир А.М., к.т.н., доцент,
Коцюрубенко О.Н., ассистент,
Одесская государственная академия строительства и архитектуры
okskorobko71@gmail.com

Аннотация. Поддержка заданного уровня механических и деформативных свойств при эксплуатации изделия обеспечивается адаптацией структуры бетона. Способность материала своевременно реагировать на влияние окружающей среды преимущественно определяется трещинами и внутренними поверхностями раздела как активных элементов структуры. Многовариантные наборы этих составляющих можно получать за счет направленной организации структуры бетона путем изменения соотношения адгезионно-когезионных сил связи на границе раздела между цементной матрицей и заполнителями. Структурное разнообразие позволяет увеличить стойкость бетона при поперемных циклах температурных и влажностных воздействий, что ведет к повышению уровня безопасности функционирования строительных изделий в сложных внешних условиях.

Ключевые слова: бетон, структурные изменения, поврежденность, малоцикловые воздействия.

SAFE FUNCTIONING OF THE PRODUCT AS A FUNCTION OF THE STRUCTURAL VARIETY OF CONCRETE

Korobko O. A., PhD., Assistant Professor,

Zakorchemny Yu. O., PhD., Assistant Professor,
Kushnir A.M., PhD., Assistant Professor,
Kotsiurubenko O.N., Assistant
Odessa State Academy Civil Engineering and Architecture
okskorobko71@gmail.com

Abstract. The purpose of the work is to increase resistance of concrete during the operation of building products in conditions of repeated freezing-thawing and wetting-drying. An important property of concrete is its ability to adapt to the periodical effect of external factors by self-organization of the structure. This implies the presence in the material of active elements capable of changing their parameters adequately to impacts. Such elements are cracks and inner surfaces of a partition as integral elements of the structure of any material. The sets of active elements provide timely structural changes and determine the change dynamics of concrete damage during the operation of the product. It is possible to receive these sets by directing the structural organization of concrete. The operating factor of the structure formation can be a change in the ratio of adhesion and cohesive binding forces at the interface between the matrix material and the surface of the fillers. Concrete whose structure was initiated by selective adhesion of a matrix to the surface of fillers had higher values of properties. The variety of the initial conditions of interfacial interactions provided increase of concrete strength to 26%, expanded clay lightweight concrete strength to 10% and modulus of elasticity to 12-21% at reduction of total porosity by 18% and water absorption by 8-14%. The structural potential ensured the resistance of concrete to freezing-thawing and wetting-drying. Sets of active elements of concrete structure are the factors of safe functioning of building products in conditions of influence of the operating environment.

Keywords: concrete, structural changes, cracks, inner interfaces of partition, damage, low-cycle fatigue influences.

Вступ. Безпека функціонування будівельних виробів визначається здатністю матеріалу при взаємодії з оточуючим середовищем не викликати зміни його основних параметрів та зберігати власні функціональні властивості в умовах дії внутрішніх і зовнішніх впливів [1, 2]. Таким чином стійкість бетону при експлуатації виробу підтримується різними механізмами адаптації, домінуючим з яких є своєчасна зміна параметрів активних елементів структури у вигляді тріщин і внутрішніх поверхонь розділу. Такі елементи відносяться до невід'ємних складових, що співіснують на всіх рівнях неоднорідностей структури бетону як поліструктурного матеріалу [3]. Керування процесами структуроутворення на кожному окремому рівні веде до одержання структур з заданим набором елементів і властивостей. На рівні макроструктури направлено організовувати набори складових можна шляхом зміни адгезійно-когезійних сил зв'язку на границі розділу між матричним матеріалом і поверхнею заповнювачів. Тим самим забезпечується можливість збільшення різноманіття початкових умов організації структури в локальних об'ємах бетону. Це визначатиме багатоваріантність наборів структурних елементів, що має підвищити рівень безпеки функціонування виробу при періодичній дії температурних і вологісних факторів на матеріал.

Мета та задачі. Виходячи з вищевикладеного, була поставлена мета досліджень – підвищити стійкість бетону за рахунок направленої організації структури шляхом зміни умов взаємодії цементної складової та заповнювачів на границі розділу між ними. Для досягнення поставленої мети були поставлені наступні задачі: проаналізувати зміну пошкодженості бетону і керамзитобетону при поперемінних зовнішніх впливах; визначити коефіцієнти стійкості бетонів при малоцикловій утомі, що пов'язана з багаторазовими циклами заморожування-відтавання та зволоження-висушування.

Об'єкти та методи аналізу. В якості об'єкту досліджень прийнята структура бетону і керамзитобетону та пошкодженість як характеристика структури, за якою можна кількісно оцінити структурну переорганізацію (адаптацію) бетонів під впливом малоциклових утомних навантажень.

Дослідження проводили на: на моделях чарунок з різним орієнтуванням імітаторів заповнювачів в цементній матриці; зразках-кубах розміром 100×100×100 мм, виготовлених з бетону і керамзитобетону на заповнювачах з різним станом поверхні.

Моделі структурних чарунок мали розміри 40×90×160 мм та були виготовлені на основі цементного тіста з В/Ц=0,3. Імітатори заповнювачів у вигляді призм розташовували таким чином, що були одержані чарунки кубічної та гексагональної форм. Кожна модель включала по три чарунки з різним орієнтуванням імітаторів один відносно одного.

Зміну стану поверхні зерен гранітного щебеня і керамзитового гравію та імітаторів заповнювачів в чарунках здійснювали шляхом апретування гідрофобізатором ГКР-11, що має пониженою адгезію до цементної складової. Це дозволило забезпечити різні співвідношення адгезійно-когезійних сил зв'язку на границі розділу між матричним матеріалом та поверхнею заповнювачів: $R_A > R_K$, $R_A < R_K$, $R_A = R_K$, де: R_A – величина адгезії матриці до поверхні заповнювачів, R_K – величина когезійної міцності матричної складової.

Залежно від умов взаємодії цементної матриці із заповнювачами було виконано коректування складів бетону за значеннями В/Ц. При постійній рухливості бетонної суміші одержано звичайний бетон класів: С30/35 при $R_A > R_K$ (склад I), С25/30 при $R_A < R_K$ (склад II), С32/40 при $R_A = R_K$ (склад III) та керамзитобетон класу LC12/13 при $R_A > R_K$ (склад I) і класу LC16/18 при $R_A < R_K$ (склад II) та $R_A = R_K$ (склад III) з відповідними показниками властивостей.

Пошкодженість матричного матеріалу оцінювали через коефіцієнт пошкодженості $K_{п}$:

– в моделях чарунок як співвідношення $K_{п} = \sum L_i / S$, 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;

– на поверхні зразків-кубів як співвідношення $K_{п} = \sum L_i / L_i$, де: $\sum L_i$ – сумарна протяжність берегів окремих тріщин і внутрішніх поверхонь розділу (фактична довжина тріщини руйнування), см, вздовж геодезичної лінії L_i , см (найкоротша відстань між точками виходу фактичної тріщини руйнування на торцеві поверхні зразка).

Виміри проводили по 5 сторонам, крім верхньої, кожного зразка, вираховуючи $K_{п}$ як середнє арифметичне одержаних значень.

Показники міцності на стиск ($f_{ck.cube}$, МПа), модуля пружності (E , МПа·10³), відкритої пористості (P_o , %), середньої густини (ρ_o , кг/м³), водопоглинання (W , %) та маси (m , грам) бетонних зразків до та після кожного циклу періодичних температурних і вологісних впливів визначали за стандартними методиками. На основі одержаних значень різних властивостей були вираховані коефіцієнти стійкості бетону і керамзитобетону при попереминому заморожуванні-відтаванні та зволоженні-висушуванні. Коефіцієнти стійкості визначали як співвідношення $K_{ст} = Q^{Nц} / Q^{28}$, де: $Q^{Nц}$ – показник властивості бетонів після певної кількості циклів впливу, Q^{28} – показник властивості бетонів після 28 діб нормального твердіння.

Результати досліджень. Групи заповнювачів при статистично вільному розташуванні зерен в об'ємі бетону, утворюють своєрідно упорядковані чарунки, обмежуючи ту чи іншу частину матричного матеріалу. Навіть при одному й тому ж складі бетону, на рівні макроструктури співіснують чарунки різних форм та розмірів з різним співвідношенням адгезійно-когезійних сил зв'язку на границі розділу між матричною складовою та поверхнею заповнювачів. В роботі [4] показано, що в кожній чарунці забезпечуються індивідуальні початкові умови структуроутворення цементної матриці. Це веде до розбіжності періодів формування структури і прояву об'ємних деформацій матричного матеріалу в чарунках та показників пошкодженості, механічних і деформативних властивостей цементного каменя в локальних об'ємах бетону. Бетони промислових складів включають багатоваріантні за геометричними параметрами набори структурних чарунок із заданими умовами взаємодії матриці з поверхнею заповнювачів. Збільшити різноманітність чарунок можна в результаті зміни співвідношення величин когезії та адгезії на міжфазних границях розділу. Чарунки являють собою відносно автономні взаємозв'язані частини бетону, в яких забезпечуються набори структурних складових, що через взаємовплив визначають потенціал структури та рівень властивостей всього матеріалу до експлуатації.

Еквіфінальним результатом різнопланових процесів та явищ формування структури бетону є утворення структурних блоків, що веде до самозародження та саморозвитку міжблочних границь розділу [4]. Подібні елементи здатні трансформуватися в тріщини і внутрішні поверхні розділу (ВІР) під впливом власних деформацій матеріалу.

Дослідження, проведені на моделях структурних чарунок, показали, що пошкодженість цементного каменя в різних чарунках відрізнялась до 2,5 разів, залежно від способу укладки заповнювачів та співвідношення адгезійно-когезійних сил зв'язку на границі розділу між матрицею та поверхнею заповнювачів. При зміні кубічної форми чарунок на гексагональну величина K_p змінювалась на 15-45%, при зміні орієнтування заповнювачів в чарунках – на 18-40%. Розбіжність величини пошкодженості матриці при різних співвідношеннях значень R_A та R_K склала 22-34%. Таким чином, в локальних об'ємах макроструктури утворюються різноманітні набори активних елементів, які на рівні бетону будуть інтегративно визначати функціональний потенціал матеріалу та умови його взаємодії з оточуючим середовищем.

Відмінність структури цементної матриці в окремих чарунках бетону підтвердилась широким діапазоном кількісних значень міцності, одержаних за допомогою вимірювача міцності бетону (прилад ИПС-МГ4,01), та швидкості поширення ультразвукових хвиль в локальних зонах бетонних зразків одного складу. Результати досліджень показали, що при багатоваріантності чарунок забезпечується найбільший розкид показників механічних та акустичних характеристик бетону і керамзитобетону в зразках. При вибірковій адгезії матриці до поверхні заповнювачів швидкість поширення ультразвуку відрізнялась до 2-3 разів. Це вказує на співіснування в бетоні одного складу різних за густиною та технологічною пошкодженістю ділянок матричної частини. Міцність на стиск цементного каменя при переході від однієї чарунки до іншої в об'ємі того ж самого зразку змінювалась на 13-33%. При багатоваріантних співвідношеннях R_A та R_K розкид показників властивостей був в 2 рази більше, ніж в зразках з повною або недосконалою адгезією матриці до поверхні заповнювачів. Відмінність кількісних значень механічних та деформативних характеристик цементної матриці в локальних об'ємах бетонних зразків при умовах $R_A > R_K$ і $R_A < R_K$ можна пояснити впливом геометричних параметрів чарунок на структуроутворення матричного матеріалу, що відбивається на рівні властивостей бетону.

Найбільш різноманітний набір чарунок в бетонах утворюється при вибірковій адгезії цементної матриці до поверхні заповнювачів ($R_A = R_K$). При таких початкових умовах були утворені структури, що сприяли підвищенню середньої густини бетону і керамзитобетону та показників їх міцності на стиск, до 10-26%, і модуля пружності, до 8-21%, при зменшенні відкритої пористості до 18% та водопоглинання до 10-14%.

Різні значення властивостей визначаються різними параметрами наборів складових структури. Оцінити зміну структурної організації бетонів можна за допомогою коефіцієнту пошкодженості, який виступає характеристикою, що відображує сумарну кількість тріщин і внутрішніх поверхонь розділу в об'ємі матеріалу [1].

До початку експлуатації пошкодженість бетонів відрізнялась на 11-15% залежно від їх складу. Після чергового заморожування чи відтавання або зволоження чи висушування бетону може відбуватися підростання тріщин, їх трансформація у ВІР або зародження тріщин з берегів внутрішніх поверхонь розділу з подальшим розвитком у вигляді самостійних елементів структури. Це веде до збільшення пошкодженості бетону.

В роботі [4] відмічається, що присутність тріщин і ВІР забезпечує саму можливість прояву різних механізмів адаптації структури до дії оточуючого середовища. Характерною особливістю цих елементів є здатність миттєво реагувати практично на будь-які зовнішні впливи, адекватно змінюючи власні параметри, та включати в роботу структурні елементи з уповільненими реакціями на швидкоплинні умови експлуатації. Розвиток тріщин в матеріалах з блочною будовою являє собою дискретно-безперервний процес у вигляді покрокового підростання тріщин після кожного циклу багаторазових впливів. Послідуючі структурні трансформації залежать від попередньої зміни параметрів тріщин і ВІР в силу того, що постійно створюються нові умови для перерозподілу деформацій і напружень на

берегах тріщин і ВПР в кожній чарунці на рівні макроструктури.

Результати досліджень, проведених на моделях з різним набором чарунок, показали, що через 6 циклів періодичного зволоження-висушування значення коефіцієнта пошкодженості зразків відрізнялися на 10-57% залежно від типу укладки заповнювачів та стану їх поверхні.

Набори тріщин і ВПР визначали також динаміку зміни пошкодженості бетону та керамзитобетону при поперемінних зовнішніх впливах (рис. 1).

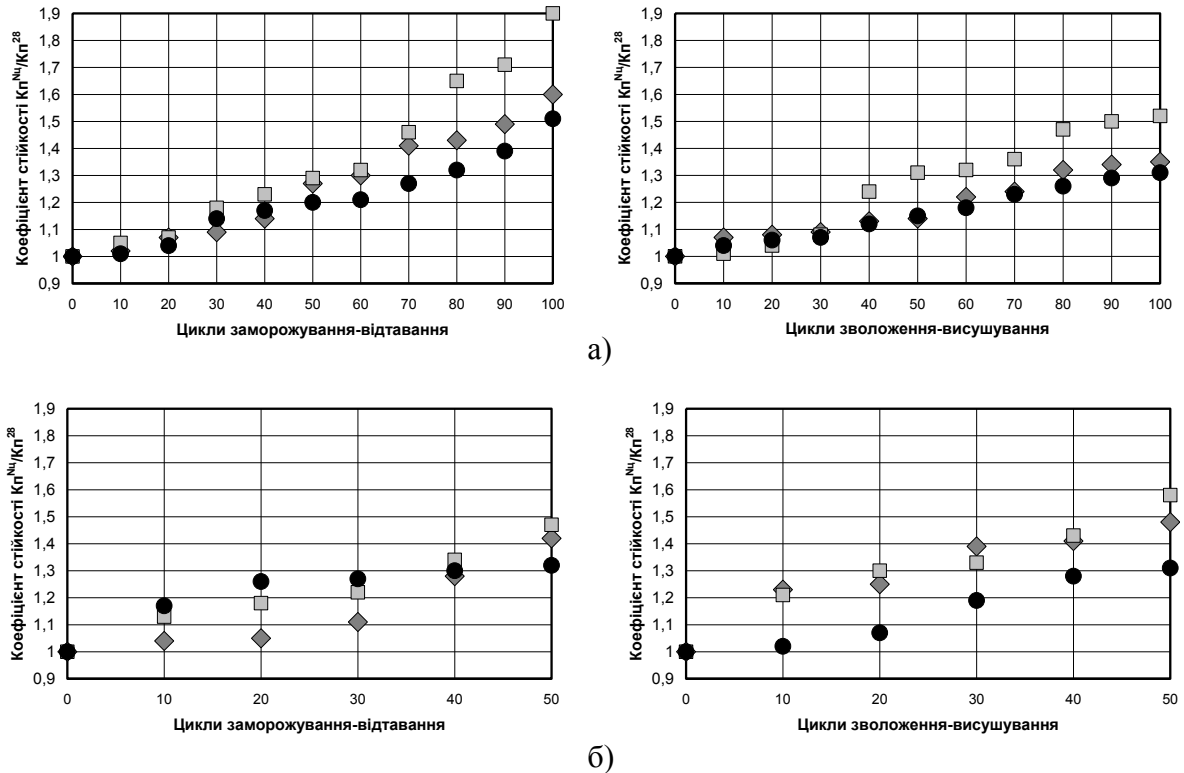


Рис. 1. Коефіцієнти стійкості $K_p = K_p^{Nц} / K_p^{28}$ бетону (а) та керамзитобетону (б) при малоцикловій утомі:

◆ – $R_A > R_K$; ■ – $R_A < R_K$; ● – $R_A = R_K$.

При багаторазових циклах поперемінних впливів пошкодженість бетону зростає на 26-48%, керамзитобетону на 24-37%. Зростання величини K_p бетонів складу III було на 20-25% меншим, ніж бетонів при інших прийнятих відношеннях значень R_A і R_K . Це вказує на те, що збільшення різноманіття структури зумовлює локалізацію тріщин в границях структурних блоків із запобіганням їх росту до розмірів, небезпечних для даного структурного рівня. Тому, при збільшенні пошкодженості цементної матриці в окремих чарунках, протяжність потенційної тріщини руйнування в бетонах при $R_A = R_K$ є меншою порівняно з бетонами складу I та II.

Зміна параметрів тріщин і ВПР відбивається на показниках коефіцієнту стійкості бетону та керамзитобетону при малоцикловій утомі, викликаній циклами періодичної зміни температури (Т) та вологи (W) навколишнього середовища (табл. 1). Кольором виділені склади, структура яких забезпечує найліпші в умовах експерименту показники властивостей бетонів.

Аналіз коефіцієнтів стійкості бетону та керамзитобетону показав, що за більшістю показників більш пристосованими до впливу поперемінних зовнішніх факторів виявилися бетони, організація структури яких відбувалась при вихідній умові $R_A = R_K$. Міцність бетонів складу III практично не змінилася після 100 циклів періодичних впливів, модуль пружності бетону підвищився на 11%, модуль пружності керамзитобетону знизився на 10%. При цьому об'єм відкритих капілярних пор зменшився на 7-10%, водопоглинання – на 0-5% (бетон) і 14-

16% (керамзитобетон), втрата маси склала не більше, ніж 2%.

Таблиця 1 – Стійкість бетону та керамзитобетону при малоцикловій утомі

N циклів	$K_{ст}=f_{ck}^{N_{ц}}/f_{ck}^{28}$			$K_{ст}=E^{N_{ц}}/E^{28}$			$K_{ст}=W^{N_{ц}}/W^{28}$			$K_{ст}=\Pi_0^{N_{ц}}/\Pi_0^{28}$			$K_{ст}=m^{N_{ц}}/m^{28}$		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Бетон															
T=0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
T=50	0,97	0,98	0,99	1,04	0,96	1,24	0,85	0,93	0,76	0,84	0,90	0,77	0,99	0,98	0,99
T=100	0,96	0,96	0,98	1,02	0,94	1,12	0,97	0,99	0,95	0,92	0,94	0,93	0,95	0,95	0,97
W=0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
W=50	1,02	1	1	1,28	1,11	1,32	0,90	0,97	0,88	0,88	0,93	0,88	0,98	0,98	0,99
W=100	1	0,98	0,99	1,22	1,02	1,29	1,04	1,03	1,0	0,99	0,98	1,0	0,95	0,95	0,98
Керамзитобетон															
T=0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
T=50	0,97	0,98	1	0,86	0,95	0,93	0,78	0,82	0,73	0,76	0,81	0,71	0,98	0,98	1
T=100	0,95	0,95	0,98	0,82	0,9	0,89	0,89	0,92	0,83	0,85	0,87	0,81	0,95	0,95	0,97
W=0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
W=50	1	1,01	1,03	1,11	1,17	1,03	0,92	1,01	0,96	0,91	0,96	0,98	0,99	0,97	0,99
W=100	0,97	0,99	0,99	1,07	1,12	0,99	1,12	1,15	1,16	1,06	1,08	1,16	0,96	0,95	0,96

Для бетонів складів I та II показники міцності зменшились до 5% при зміні величини модуля пружності до 18%, збільшенні водопоглинання на 3-13% та відкритої пористості на 11-14%, втрата маси досягала 5%.

Відмінність початкових умов структуроутворення на макрорівні забезпечила структури бетону і керамзитобетону, потенціал яких дає змогу використовувати будівельні вироби в умовах періодичних змін вологості та температури навколишнього середовища.

Висновки. Проведені дослідження показали, що підвищення стійкості бетонів при поперемих зовнішніх впливах забезпечується направленою організацією їх структури. Задавати початкові умови структуроутворення можна за рахунок зміни співвідношення адгезійно-когезійних сил зв'язку на границі розділу між матричною складовою та поверхнею заповнювачів. Це дозволяє одержувати структури з різними наборами елементів, що сприяє прояву різних ефектів адаптації, переважно пов'язаних з самозародженням та саморозвитком тріщин. Бетон і керамзитобетон зі структурою, що організується при вибірковій адгезії цементної матриці до поверхні заповнювачів, виявилися краще пристосованими до впливу малоциклових утомних навантажень. Структурне різноманіття є фактором, що визначає стійкість матеріалу та безпеку функціонування виробів у складних умовах експлуатації.

Література

1. Выровой В.Н. Композиционные строительные материалы и конструкции. Структура, самоорганизация, свойства / В.Н. Выровой, В.С. Дорофеев, В.Г. Суханов. – Одесса: Изд-во «ТЭС», 2010. – 169 с.
2. Чернявский В.Л. Адаптация абиотических систем: бетон и железобетон / В.Л. Чернявский. – Д.: ДНУЖДТ, 2008. – 412 с.
3. Соломатов В.И. Полиструктурная теория композиционных строительных материалов / [В.И. Соломатов, В.Н. Выровой, А.Н. Бобрышев и др.]. – Ташкент: ФАН, 1991. – 345 с.
4. Суханов В.Г. Структура материала в структуре конструкции / В.Г. Суханов, В.Н. Выровой, О.А. Коробко. – Одесса: ПОЛИГРАФ, 2016. – 244 с.

Стаття надійшла 4.05.2018