

ТЕХНІЧНИЙ СТАН ТА ПІДСИЛЕННЯ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД

УДК 666: 519.8

КОМПЛЕКСНА БЕЗПЕКА ФУНКЦІОНУВАННЯ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

COMPLEX SAFETY OPERATION OF BUILDING STRUCTURES

Вировой В.М., д.т.н., проф., **Коробко О.О.**, д.т.н., доц., **Кушнір О.М.**, к.т.н., доц., **Пекар Л.В.**, асистент, **Уразманова Н.Ф.**, аспірант (Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса)

Vyrovoy V.M., doctor of technical sciences, professor, **Korobko O.O.**, doctor of technical sciences, docent, **Kushnir O.M.**, candidate of technical sciences, docent, **Peкар L.V.**, assistant, **Urazmanova N.F.**, post-graduate student (Odessa State Academy Civil Engineering and Architecture, Odessa)

В технологічний період одержання матеріалу та його переробки у виріб в структуру конструкції має бути закладений певний набір елементів та їх параметрів, які здатні забезпечити реалізацію прояву механізмів такої структурної переорганізації, яка буде гарантувати комплексну безпеку функціонування конструкції, підтримуючи її цільове призначення.

The presence of cracks in the material of the structure determines the permanent nonequilibrium state of the structure as a whole and its individual components. This contributes to the development changes in organization system of the structure, an increase in its structural diversity and, as a result, the transition to a more equilibrium and stable state. This allows us to conclude about the structure-forming role of cracks in the structural development of building structures. At the same time, there is no other reason for the destruction of structures as through the irreversible development of cracks. Therefore, it is necessary to analyze the dual role of cracks from the point of view of studying the conditions for the transition from cracks performing a creative role to cracks causing the destruction of building composites, and to show the effect of cracks in ensuring the safe functioning of structures and products, which was defined as research objectives. The safety work of the structure is associated with the provision of external and internal safety. Integrated safety presupposes self-preservation of the main parameters of properties under the influence of external and internal factors. This, in turn, to a certain extent guarantees the prevention of dangerous situations during the interaction of this structure with other structures and elements

surrounding it. Ensuring the safe functioning of a structure as an open complex dynamic system is associated with the directed organization of its initial structure, which contains, as a control factor, a certain set of induced active, metastable and conservative elements. Depending on the type of external loads, the induced elements, through changes in their own parameters, through interdependent interactions and mutual influence, contribute to the preservation of the integrity of the system and its safe operation.

Ключові слова: конструкція, бетон, структура, тріщини, внутрішні поверхні розділу, деформації, пошкодженість, безпека, функціонування structure, concrete, structure, cracks, internal surfaces of section, deformations, damage, safety, operation.

Вступ. Для гарантування безпеки функціонування будівельної конструкції протягом проектного терміну експлуатації, потрібно забезпечити умови, за яких конструкція зберігатиме свою цілісність, протидіючи руйнуванню. Фахівці відзначають певні етапи «життя» тріщини - від моменту її зародження і підростання до перетворення на магістральну з виходом фронту тріщини на поверхню зразка або конструкції. Специфічна роль тріщини полягає в здатності концентрувати виникаючі деформації та напруження у свого устя, що значно полегшує процес її зростання в середовищі матеріалу [1]. Термін «тріщина» містить певний смисловий дуалізм, тому слід розділяти смислове навантаження даного терміну в залежності від тієї ролі, яку тріщина виконує в матеріалі. В поліструктурних матеріалах поява тріщин на різних рівнях структурних неоднорідностей є неминучою. Присутність тріщин у матеріалі конструкції зумовлює перманентний невірноважений стан конструкції в цілому та її окремих складових частин. Це сприяє розвитку структури конструкції, збільшенню її структурного різноманіття та переходу в більш рівноважний і стабільний стан. Як результат, відбувається стабілізація властивостей конструкції і, тим самим, забезпечується реалізація її функціональних можливостей. Це дозволяє зробити висновок про структуроутворюючу роль тріщин у структурному розвитку будівельних конструкцій. У той же час не існує іншої причини руйнування конструкцій як через незворотний розвиток тріщини. Тому, необхідно проаналізувати подвійну роль тріщин через вивчення умов переходу від тріщин, що виконують структуроутворюючу роль, до тріщин, що ведуть до руйнування будівельних конструкцій, та показати вплив тріщин у становленні безпеки функціонування конструкцій і виробів.

Аналіз останніх досліджень. На даний момент в сучасному матеріалознавстві існують загальноприйняті методи кількісної оцінки

в'язкості руйнування матеріалу за допомогою визначення коефіцієнтів концентрації напружень. Появу тріщин слід розглядати як об'єктивний процес, що реалізується на різних масштабних рівнях поліструктурних матеріалів. Причинами виникнення та розвитку тріщин фахівці вважають власні об'ємні деформації матеріалу в цілому та його окремих складових, градієнти температурних і вологісних деформацій, стискаючі деформаційні ефекти, корозійні та осмотичні явища [2, 3, 4]. Разом з цим, тріщини, внутрішні поверхні розділу та поля залишкових деформацій, які присутні в матеріалі до експлуатації конструкції, мають статус умовно «невидимих» елементів, хоча їх об'єктивне існування підтверджується практично всіма експериментальними дослідженнями. Але при поясненні та інтерпретації отриманих результатів присутність цих елементів у структурі конструкцій, як правило, ігнорується. Механізми зародження і зростання тріщин у гетерогенних грубодисперсних матеріалах майже не вивчаються. Хоча саме гетерогенність матеріалів типу бетонів і цементного каменю створює умови для виникнення поверхонь розділу з подальшою їх трансформацією в тріщини на різних рівнях структури.

Постановка мети та задачі досліджень. Для аналізу слід розглянути повний цикл існування конструкції, включаючи активну фазу її функціонування. Виходячи з цього, була поставлена, мета роботи - підвищити безпеку функціонування будівельних виробів за рахунок забезпечення певного набору активних елементів структури бетону, до яких віднесені тріщини, внутрішні поверхні розділу та залишкові деформації, шляхом спрямованої зміни умов взаємодії матричного матеріалу, що твердіє, та заповнювачів. Для досягнення мети роботи були визначені такі задачі: - проаналізувати роль активних елементів, особливо тріщин, в життєвому циклі будівельних конструкцій, - вивчити умови переходу тріщин, що виконують структуроутворюючі функції, в тріщини, які викликають руйнування матеріалів і конструкцій.

Методика досліджень. Експериментальні дослідження проводилися на стандартних зразках-кубах, виготовлених з бетонних сумішей на гранітному щебені та керамзитовому гравії, що мали різний стан поверхні. Разом з традиційними складами важкого і легкого бетонів використовували склади, які містили природні заповнювачі та заповнювачі, що були апретовані гідрофобізатором ГКР-11. Це дозволило забезпечити такі співвідношення адгезійно-когезійних сил зв'язку на границі розділу між цементною складовою та поверхнею заповнювачів: $R_A > R_K$; $R_A < R_K$; $R_A = R_K$, де: R_A - величина адгезії матричного матеріалу до поверхні заповнювача, R_K - величина когезійної міцності цементної матриці. При постійній рухливості бетонної суміші були отримані бетон і керамзитобетон різних класів, що

відрізнялися за показниками властивостей, зокрема параметрами початкової пошкодженості.

Пошкодженість зразків, виробів, конструкцій поверхневими тріщинами і внутрішніми поверхнями розділу опосередковано відображає характер об'ємного тріщиноутворення. «Рисунок» тріщин на поверхні об'єкту повторює «рисунок» тріщин всередині об'єкту, що дозволяє оцінити протяжність берегів тріщин в об'ємі матеріалу.

Пошкодженість цементної складової оцінювалася через коефіцієнти пошкодженості: - як співвідношення $K_p = \Sigma L_i / S$, см/см², де: ΣL_i - сумарна протяжність технологічних тріщин і внутрішніх поверхонь розділу на виділеній поверхні зразка, см; S - фіксована площа поверхні зразка, см²; - як співвідношення $K_{p1} = \Sigma L_i / L_i$, де: ΣL_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).

Результати досліджень. У структурі композиційних будівельних матеріалів та виробів можна виділити за характером впливу та швидкістю реагування три види елементів структури - консервативні, метастабільні та активні [5]. Для спрямованої організації структури слід враховувати значення кожного елемента та їх взаємовплив на формування властивостей споживчого продукту.

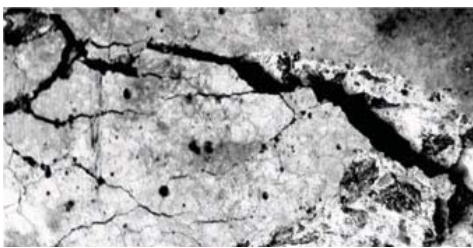
Параметри консервативних елементів залишаються практично незмінними протягом тривалих часових інтервалів, співрозмірних з періодами активного функціонування виробів. Роль таких елементів зводиться до забезпечення умов збереження комплексу властивостей в заданих межах. Метастабільні елементи виникають в результаті реалізації певних подій при дії на систему зовнішніх і внутрішніх факторів (наприклад, внаслідок зміни якісного і кількісного складів новоутворень при триваючих реакціях гідратації або за рахунок хімічної корозії, зміни капілярно-пористої структури тощо). Роль метастабільних елементів структури можна звести до спонтанних процесів перебудови внутрішньої архітектури системи відповідно до рівня і виду впливів. Метастабільні елементи досить інертні, оскільки для їх прояву потрібен певний час і відповідні умови для їх розвитку. До активних елементів віднесені тріщини і внутрішні поверхні розділу, а також локальні та інтегральні залишкові деформації, як елементи, які здатні адекватно, в одному темпоритмі, реагувати практично на весь набір зовнішніх і внутрішніх впливів. Залежно від виду активних елементів визначається їх роль у поведінці матеріалів, виробів та конструкцій.

Присутність тріщин на всіх рівнях структурних неоднорідностей порушує суцільність матеріалу, що в багатьох випадках робить неможливим оцінку властивостей за середніми значеннями. Тріщини сприяють самозбереженню

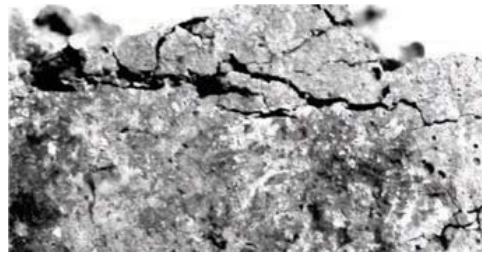
матеріалів і виробів через адаптаційну самоорганізацію. Активність внутрішніх поверхонь розділу проявляється при перерозподілі зусиль і деформацій в матеріалі, релаксації деформацій, розсіюванні частини надлишкової енергії, спрямованих процесах масопереносу та передачі теплової енергії. Внутрішні поверхні розділу є своєрідним бар'єром на шляху підростання тріщин. Взаємне перетворення тріщин у поверхні розділу і навпаки дозволяє заключити про перманентну взаємодію різних за видом активних елементів, що значною мірою визначає період активного функціонування конструкцій. Особлива роль відводиться залишковим деформаціям, сам факт існування яких повністю змінює якісну картину розрахункових схем будівельних виробів, що веде до зміни кількісних значень розподілу деформацій у виробках під навантаженням. Деформації, розподіл яких залежить від геометричних характеристик конструкцій, впливають на траєкторію розвитку тріщин і умови фрагментування матеріалу конструкцій. Залишкові деформації ведуть до флуктуації густини матеріалу, що викликає зміну властивостей матеріалу одного і того ж складу у виробках.

Поведінка будівельних конструкцій і виробів в умовах експлуатації значною мірою визначається безперервними структурними змінами, які залежать від динаміки взаємодії та саморозвитку виділених активних елементів. Кількісно оцінити зміну структури матеріалу під дією зовнішніх факторів можна через коефіцієнти пошкодженості K_p і K_{p1} .

Розвиток магістральної тріщини проходить по траєкторії експлуатаційних тріщин і внутрішніх поверхонь розділу, що накопичуються в матеріалі під дією силових навантажень (рис. 1). Це передбачає, що геометричні параметри тріщини руйнування спадково визначаються кількістю та рельєфом берегів початкових тріщин і внутрішніх поверхонь розділу, орієнтованих по фронту її підростання. Найменшими значеннями пошкодженості K_{p1} , в умовах експерименту, відзначалися зразки з бетону і керамзитобетону, що мають структуру, організовану при $R_A=R_K$.



а)



б)

Рис. 1. Пошкодженість та тріщини руйнування бетонів на гранітному щебені (а) та керамзитовому гравії (б)

Проведені дослідження показали, що показники пошкодженості важкого бетону збільшуються при формуванні структури в умовах $R_A=R_K$, на 21% і 29%, порівняно зі структурами, організованими при $R_A>R_K$ або $R_A<R_K$, відповідно. Вибірковість адгезії матричного матеріалу до поверхні заповнювачів веде до утворення структури, що забезпечує зменшення значень пошкодженості керамзитобетону, які є меншими, ніж значення K_p керамзитобетонних зразків традиційних складів на 19-39%.

Після 100 циклів попереминої дії температурних і вологісних впливів пошкодженість бетонів збільшилася в середньому на 40% (важкий бетон) і 30% (керамзитобетон). При цьому показник коефіцієнта пошкодженості K_{p1} був меншим при збільшенні показника коефіцієнта пошкодженості K_p . Порівняно з величиною пошкодженості бетонів традиційних складів, бетони з вибірковою адгезією ($R_A=R_K$) цементної матриці до поверхні заповнювачів мали структуру, при якій значення K_p були більшими на 11-15%, а значення K_{p1} меншими на 20-25%. Це свідчить про те, що збільшення структурного різноманіття веде до формування структури, при якій початковий розподіл тріщин запобігає їх подоростанню до розмірів, небезпечних для певного рівня неоднорідностей і всього матеріалу.

Проведений аналіз дозволяє заключити, що всі елементи структури, кожен по-своєму, і особливо активні елементи, значною мірою визначають умови безпечного функціонування будівельних конструкцій і виробів через адекватні структурні зміни матеріалу.

При системному підході розрізняють для конкретної системи зовнішню і внутрішню безпеку [6]. Під зовнішньою безпекою розуміють здатність системи при її взаємодії з навколишнім середовищем не викликати зміни основних параметрів, що характеризують стан середовища. Внутрішня безпека відображає здатність системи зберігати свою цілісність і основні функціональні властивості в умовах різного виду впливів. При цьому підкреслюється, що внутрішня безпека визначається показником гомеостазу системи.

Об'єктом аналізу є будівельна конструкція, яка, у вигляді підсистеми, входить до складу більш складної системи - будівельного об'єкту (будівлі, споруди). Виходячи з цього, доцільно виділити у вигляді важливого атрибуту конструкції як підсистеми її зовнішню безпеку. Таке виділення зовнішньої безпеки, як важливої властивості, обґрунтовується тим, що порушення стійкості системи (зміна гомеостазу) може нести загрозу (небезпеку) сусіднім конструктивним елементам, що може призвести до зниження рівня їх безпечного функціонування. Для підтримки зовнішньої безпеки конструкції як підсистеми мають бути забезпечені параметри гомеостазу, що гарантують внутрішню безпеку. При зміні властивостей конструкції як підсистеми, сусідні конструктивні елементи, самозберігаючи свою цілісність, мають

розсіювати небезпечні впливи. Тому, на нашу думку, для відкритих складних систем, якими є будівельні конструкції [5], доцільно виділити в загально структурні закономірності не тільки зовнішню і внутрішню безпеку, а й комплексну безпеку.

Під комплексною безпекою в нашому випадку розуміється стан системи, при якому забезпечується поєднання зовнішньої і внутрішньої безпеки як комплексу взаємодіючих підсистем, яке дозволяє зберегти стійкість системи. Одним із шляхів прояву ефектів комплексної безпеки можна вважати самоузгодженість роботи активних і метастабільних елементів структури. Звертає на себе увагу, що шляхи, спрямовані на збереження гомеостазу системи, для різних підсистем різні. Для активних елементів характерна зміна їх параметрів при взаємному перетворенні, в той час як метастабільні елементи змінюють матеріальну складову системи, провокують явища масопереносу всередині структурних блоків та між ними, й т. п. Збіг певних темпоритмів взаємодії активних і метастабільних структурних елементів при дії на систему внутрішніх і зовнішніх впливів є одним з важливих факторів забезпечення внутрішньої і, через неї, колективної безпеки.

Тріщини, які самозародилися в період становлення матеріалу та які здатні, змінюючи свої параметри, стабілізувати метаморфози структури на своєму рівні неоднорідностей, включати в роботу метастабільні елементи, перетворюватися на внутрішні поверхні розподілу і, тим самим, релаксувати деформації і напруження, сприймати і перерозподіляти на своїх берегах об'ємні деформації тощо, можна віднести до структуроутворюючих тріщин. Таким чином, структуроутворююча роль тріщин полягає в їх впливі на локальні структурні зміни матеріалу, спрямовані на збереження його властивостей при дії на конструкцію всього комплексу експлуатаційних навантажень.

Руйнування являє собою кінцевий результат розвитку тріщин у матеріалі. Це дозволяє віднести тріщини, які здатні розділити своїми берегами матеріал зразків та конструкцій на окремі частини, до тріщин-руйнівників. Такі тріщини, як правило, не виникають у матеріалі відразу, а проходять певні етапи розвитку. Кожна тріщина має пройти етапи зародження, підростання, зростання до магістральної тріщини і незворотного зростання до виходу фронту тріщини на поверхню об'єкту, що руйнується. Тріщини-руйнівники з'являються в структурі матеріалу як результат вичерпання функцій структуроутворюючих тріщин. Це передбачає, що при певних структурних перетвореннях структуроутворюючі тріщини даного рівня неоднорідностей можуть прорости на наступний рівень з одночасним збільшенням площі поверхні берегів і протяжності фронту. Це веде до збільшення концентрацій напружень в усті тріщини, що означає її переважний розвиток порівняно з більш «короткими» структуроутворюючими тріщинами і перетворення на магістральну тріщину. Не виключені ситуації, при яких збільшується

кількість структуроутворюючих тріщин в одиниці об'єму матеріалу з їх укрупненням до розміру тріщин-руйнівників (об'ємне руйнування).

Виявлення причин настання кризових ситуацій при експлуатації будівельних об'єктів досить складне завдання, яке не може бути повністю вирішене в рамках існуючої парадигми. Перспективним напрямком виявлення причин зниження безпеки слід вважати, на нашу думку, аналіз структурних особливостей конструкції. При цьому в якості керуючих факторів визначаються елементи структури, які здатні шляхом зміни власних параметрів підтримувати гомеостаз конструкції як системи і, тим самим, забезпечувати її внутрішню, зовнішню та комплексну безпеку.

Висновки. Проведений аналіз дозволяє зробити висновок, що безпека роботи конструкції пов'язана із забезпеченням зовнішньої і внутрішньої безпеки. Комплексна безпека передбачає самозбереження основних параметрів властивостей під дією зовнішніх і внутрішніх факторів. Це, в свою чергу, певною мірою гарантує попередження виникнення небезпечних ситуацій при взаємодії даної конструкції з оточуючими її іншими конструкціями та елементами. Безпека функціонування конструкції визначається спрямованою організацією її початкової структури, в яку закладено, в якості керуючого фактора, певний набір наведених активних, метастабільних і консервативних елементів. Залежно від виду зовнішніх навантажень наведені елементи, через зміни власних параметрів, шляхом взаємообумовлених взаємодій і взаємовпливу, сприяють збереженню цілісності системи та її безпечному функціонуванню.

1. Зайцев Ю.В., Леонович С.Н. Прочность и долговечность конструкционных материалов с трещиной : монография. Минск : БЕНТУ, 2010. 362 с.

Zaitsev Yu.V., Leonovych S.N. Prochnost y dolhovechnost konstruktsyonnykh materialov s treshchynoi : monohrafiya. Mynsk : BENTU, 2010. – 362 s.

2. Dvorkin L. Design estimation of concrete frost resistance. *Construction and Building Materials*. 2019. № 211. P. 779-784.

3. Махутов Н.А. Комплексные исследования процессов разрушения материалов и конструкций. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2018. № 84(11). С. 46-51.

Makhutov N.A. Kompleksnye yssledovaniya protsessov razrusheniya materialov y konstruktsyi. *Zavodskaiya laboratoriya. Dyahnostyka materialov*. 2018. № 84(11). S. 46-51.

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

Sukhanov V.N., Vyrovoy V.N., Korobko O.A. Struktura materiala v strukture konstruktsyy : monohrafiya. Odessa : POLYHRAF. 2016. 244 s.

5. Могилевский В.Д. Методология систем: (вербальный подход) : монография. Москва : Экономика, 1999. 251 с.

Mohylevskiy V.D. Metodolohiya system: (verbalnyi podkhod) : monohrafiya. Moskva : Ekonomyka, 1999. 251 s.