

ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ ІНЖЕНЕРНО-БУДІВЕЛЬНИЙ ІНСТИТУТ

На правах рукопису

ДОРОФЕЄВ Віталій Степанович



ТЕХНОЛОГІЧНА ПОШКОДЖЕНІСТЬ БЕТОНУ
ТА ЇЇ ВПЛИВ НА РОБОТУ КОНСТРУКЦІЙ

05.23.05 - Будівельні матеріали та вироби

05.23.01 - Будівельні конструкції, будови
та споруди

АВТОРЕФЕРАТ ДИСЕРТАЦІЇ

на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дніпропетровськ - 1983

Дисертація є наукова доповідь.

Робота виконана в Одеському інженерно-будівельному інституті.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Вировий Валерій Миколайович

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Сергєєв Аврор Михайлович

доктор технічних наук, професор
Комохов Павло Григорович

доктор технічних наук, професор
Пахомов Володимир Олександрович

Провідна організація: Науково-дослідний інститут буді-
вельного виробництва /НДІВВ/ Міні-
стерства в справах будівництва та
архітектури України

Захист відбудеться "15" грудня 1993 р. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 068.32.01 в Дніпропетровському інженерно-будівельному інституті за адресою: 320600, м. Дніпропетровськ, вул. Чернишевського, № 24 "а", ДІВІ.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Дніпропетровського інженерно-будівельного інституту за адресою: м. Дніпропетровськ, вул. Чернишевського, № 24 "а".

Автореферат розісланий "15" листопада 1993 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради *А. Лук'яненко* Лук'яненко А.М.

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00814140 (1)

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність. Складна будова будівельних матеріалів дозволяє розглядати їх як композиційні з багаторівневою організацією структури. В свою чергу, будівельні конструкції являють собою систему з внутрішньою ієрархією структурних рівнів та підрівнів. Розглядаючи її як складну систему, можна оцінити частку внеску кожного структурного елемента в роботу конструкції. Особливу увагу необхідно приділяти тріщинам, що з'явилися у матеріалі в період технологічної переробки у виріб (технологічним тріщинам). Присутність їх в конструкціях до прикладення експлуатаційних навантажень повинна призвести до зміни загального та локального напруженого стану, кінетики розвитку експлуатаційних тріщин, характеру руйнування, деформації та несучої здатності. Тому необхідно розкрити причини зародження і розвитку технологічних дефектів на різних рівнях структурних неоднорідностей матеріалу, накреслити шляхи направленного структуроутворення і керування кількістю та видами технологічних дефектів, що дозволяє прогнозувати дефектність конструкції, більш повно реалізувати потенційні властивості матеріалу в кожному конструктивному елементі та й в конструкції в цілому. Направлене регулювання початкової пошкодженості дозволить розв'язувати актуальні задачі підвищення якості та зниження матеріалоемкості будівельних матеріалів і конструкцій.

Мета роботи. Прогнозування роботи бетонних та залізобетонних конструкцій як складноутворених систем з врахуванням направленного регулювання початкової (технологічної) пошкодженості матеріалу.

Задачі досліджень:

- розглянути роботу матеріалів в конструкціях, як в складноутворених системах, взаємозалежність та взаємний вплив підсистем в процесі їх роботи;
- виявити основні причини зародження і розвитку технологічних дефектів в процесі організації структури композиційних будівельних матеріалів та конструкцій;
- з'ясувати вплив технологічної пошкодженості на основні фізико-механічні властивості та експлуатаційну надійність бетонних та залізобетонних конструкцій;

- розробити технологічні способи (застосування мінеральних наповнювачів, включаючи відходи виробництва) керування початковою пошкодженістю матеріалів з врахуванням умов експлуатації конструкції;

- виявити залежність між загальною пошкодженістю та зміною фізико-механічних властивостей бетону в конструкції;

- описати еволюцію технологічних тріщин в експлуатаційні в будівельних матеріалах і конструкціях при різних зовнішніх діях;

- встановити вплив технологічної пошкодженості бетону на роботу конструкцій;

- розробити рекомендації по врахуванню технологічної пошкодженості бетону в роботі конструкцій.

Наукова новизна роботи. На основі аналізу і теоретичного узагальнення взаємозв'язку структури та властивостей бетонів і конструкцій з них, з врахуванням основних положень технологічної та структурної механіки, фізико-хімічної механіки, теорії міцності і розрахунку будівельних конструкцій встановлено:

- бетонні і залізобетонні конструкції являють собою складно-утворені системи з ієрархічною залежністю окремих структурних рівнів та елементів, що дозволяє виділити найбільш важливі структурні рівні, відповідальні за міцність, деформативність та несучу здатність окремих частин і конструкції в цілому;

- важливими структурними елементами, що в значній мірі визначають поведінку матеріалу в конструкції, є технологічні (початкові) тріщини, які присутні в конструкції до прикладення до неї експлуатаційних навантажень та дій (позит. ріш. № 5008907/33 (059304) від 03.07.91р., № 4908067/12(011621) від 06.12.91 р., а.с. № 1772117 СРСР);

- причинами утворення технологічних тріщин є комплекс фізико-хімічних та фізико-механічних явищ і процесів, що протікають на всіх рівнях структурних неоднорідностей в період технологічної переробки матеріалу у виріб, що дозволяє рекомендувати способи (наприклад, спрямоване застосування мінеральних наповнювачів) керування початковою пошкодженістю бетону;

- технологічна пошкодженість, в значній мірі, визначає механічні і деформативні характеристики бетонів різних класів, інтенсивність накопичення і кінетику розвитку експлуатаційних трі-

щин, характер руйнування і стійкість бетонів при їх роботі в конструкціях, що експлуатуються в різних умовах навантаження і екологічного впливу середовища експлуатації;

- пошкодження матеріалу технологічними дефектами можна змінювати в потрібних напрямках та слід враховувати в роботі конструкцій шляхом уточнення міцнісних характеристик, діаграми деформування бетону та умов міцності при одноосному та двохосному напруженому стані.

Практична цінність та впровадження результатів роботи. Результати роботи використані в таких нормативних документах:

- ТУ 204 УРСР 265-88. Зола-унос від спалювання твердих побутових відходів Кримського термічного заводу для керамічної цегли та каміння;

- ТУ 204 УРСР 266-88. Золошлакова суміш від спалювання твердих побутових відходів Кримського термічного заводу для керамічної цегли та каміння;

Результати роботи використані та впроваджені на таких підприємствах та в установах: об'єднанні "Кримбудматеріали" (1987р.), Виробничому об'єднанні "Одеськзалізобетон" (1988 р.), НДІБВ Держбуду України (1990 р.), ПДКТІ "Одеський будпроект" (1991 р.), НДІЗБ (1993 р.), Одеському інженерно-будівельному інституті (1975...1992 р.р.).

Економічний ефект від впровадження результатів роботи складає 4.21 млн.крб. (в цінах до 1990 р.).

Апробація роботи. Основні положення цієї роботи обговорені на V і VI національних конференціях з механіки і технології композиційних матеріалів Болгарської академії наук (Софія - 1988, 1991 р.р.), XXIII і XXIV міжнародних конференціях в галузі бетону і залізобетону ("Волго-Балт"-91 та "Домбай"-92), міжнародній конференції (Челябінськ - 1992 р.), всесоюзних конференціях з питань будівельних матеріалів і конструкцій (Челябінськ - 1990, 1991, Суми - 1991 р., Одеса - 1975 р.), республіканських конференціях (Алма-Ата - 1990 р., Полтава - 1989 р., Сімферополь - 1988 р.), республіканських семінарах з технологічної механіки композиційних матеріалів (Одеса - 1989...1992 р.), конференції з гідротехніки ВНДІГ ім. Б.С.Веденєєва - 1990 р., галузевих науково-практичних конференціях по будівельних матеріалах і кон-

струкціях (Москва - 1989 р., Саранськ - 1989, 1990 р.р., Рівне - 1987, 1990 р.р., Челябінськ - 1990 р., Черкаси - 1987 р.), науково-технічних конференціях Одеського інженерно-будівельного інституту (1975...1992 р.р.).

По даному науковому напрямку захищені дисертації аспірантами Хаджи Хасаном Рамаданом (05.23.01), Кушнарвою Г.О. (05.23.01), Абдалла Хамідом Хусейном (05.23.01), Шеховцовим І.В. (05.23.01), Кара Дамуром Ахмадом Хамді (05.23.01), Майстренко Ф.М. (05.23.05). Науковим керівником даних дисертацій був автор.

Публікації. Основні положення дисертації викладені в 77 роботах, у тому числі в одній монографії, трьох брошурах, трьох навчальних посібниках та чотирьох авторських свідоцтвах.

Автор висловлює щирю подяку докторам технічних наук, професорам Соломатову В.І. та Залесову О.С. за цінні пропозиції та зауваження в процесі роботи над дисертацією.

ЗМІСТ РОБОТИ

При виборі та обґрунтуванні основних напрямків досліджень проаналізовано літературні дані наукових колективів і шкіл КПІ, КІВІ, ДІВІ, ХІВІ, ХАДІ, ОІВІ, ЛПІ, Полт.ІВІ, УІВХС, ЛІІЗТ, МІІТ, Вор.ІВІ, ЛІВІ, МІВІ, ТашІІТ, МЕІ, МДУ ім. Ломоносова, Пенз.ІВІ, Тбіл.ТУ та ін., ФТІ ім. А.Ф.Йоффе АН Росії, Інституту механіки полімерів АН Латвії, Інституту фізики твердого тіла АН Росії, Інституту механіки АН України, Фізико-механічного інституту АН України, Інституту проблем міцності АН України, НДІБК, НДІБВ, ЦНДІБК, НДІЗБ, КиївЗНДІЕП та інших, а також зарубіжних дослідників Е.М.Бу, Ш.Ч.Чоу, Я.Дундурса, М.Комниюу, К.Харримана, Х.Брауна, Дж.СІ, А.Келлі, К.Чамиса, А.Р.Бюнселя, Р.Е.Роуланда, Е.Л.Стоуна, С.У.Сміта, Дж.П.Сендецького, В.Р.Ригеля, Т.Фудзії, Р.Кристенсена, Дж.Карері, Д.Броска, А.Адамсона, А.А.Гриффітса, М.Е.Графа, Г.Хакена, Л.Браутмана, Р.Крока, Л.Нільсена, К.Майера, В.Нільсона, Л.Ван.Флека, Ленга та ін., присвячених формуванню структури на різних рівнях структурних неоднорідностей композиційних матеріалів і конструкцій, механіці композитів, дослідженню фізико-механічних властивостей та напружено-деформованого стану конструкцій.

1. БУДІВЕЛЬНІ МАТЕРІАЛИ І КОНСТРУКЦІЇ ЯК СКЛАДНІ СИСТЕМИ

Композиційні будівельні конструкції (КБК) розглядаються як спеціально організовані композиційні будівельні матеріали (КБМ), взаємодія окремих складових і структурних елементів яких забезпечує виконання функціонального призначення конструкцій. Це дозволяє уявити КБК і КБМ як складні системи, що відповідають загальним вимогам: складаються з підсистем, підсистеми складають деяку цілісність, між окремими елементами і підсистемами існує взаємозв'язок, виділена система є підсистемою більшої системи.

Складність подібних систем обумовлена як їх різноманітним якісним та кількісним складом, так і досить складною поведінкою в процесі їх становлення та функціонування. Експлуатаційна надійність КБК, в значній мірі, визначається здатністю КБМ адаптуватися до умов і режимів роботи конструкцій. Тому важливо враховувати становлення та трансформування просторово-часових структур матеріалу від моменту його одержання до нормованого кінця строку служби в конструкції. Описання цих процесів можливе при мультидисциплінарному підході, що дозволить розкрити роль кожного структурного елементу у формуванні властивостей готового матеріалу з метою прогнозування їх поведінки у виробі. Подібний підхід уявляється перспективним для розкриття потенційних можливостей матеріалу при роботі конструкції.

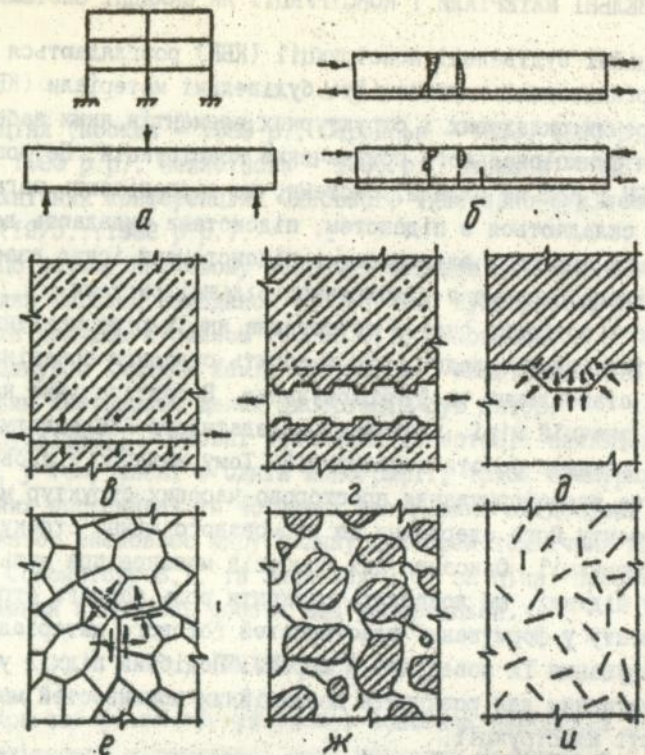
Таким чином, структура конструкції включає уся різноманітність структур матеріалу. Фізичну складну неоднорідну модель КБК можна виразити як систему підмоделей (мал. 1).

На макрорівні структуру конструкції можна уявити як структурний піделемент, що входить в систему більш складної конструкції, будови чи споруди (мал. 1,а).

Структура конструкції трохи трансформується за рахунок реакції матеріалу і окремих конструктивних елементів на зовнішні дії (мал. 1,б).

Аналіз роботи (умови рівноваги, тріщиностійкість, розрахунок по першій та другій групам граничних станів) при прийнятій моделі проводять з позицій механіки суцільного середовища (мал. 1,в).

Отже, на макрорівні структура конструкції подана як конструктивно оформлений матеріал, властивості якого характеризуються



Мал. 1. Структурні рівні конструкції: а/ макроструктура /макромодель/; б/ внутрішньоструктурні зв'язки макромоделі конструкції; в/ характерна модель на рівні різномірних матеріалів; г/ структура границі взаємодії різномірних матеріалів; д/ механізм формування границі розділу; е/ дискретна структура матричного матеріалу на рівні блочно-будови цементного каменю; ж/ структура матеріалу на рівні неоднорідності "цементний камінь - заповнювач"; и/ статистичний характер розподілу технологічних дефектів у мікроструктурі бетону

середніми параметрами якості та структурними піделементами у вигляді арматури.

Формування макроструктури конструкції залежить від сталості зв'язків між окремими структурними піделементами. Тому можна виділити у вигляді самостійної підструктури елемент, що забезпечує спільність роботи двох різномірних матеріалів - бетону та арматури (мал. 1,в).

У виділеному структурному піделементі існує власна система внутрішньоструктурних зв'язків. На окремих ділянках можуть виникати локальні деформації та напруження як в окремих зонах контактуючих матеріалів, так і в зоні їх контакту (мал. 1,г).

В структуру конструкції можна ввести новий елемент - границю розділу матричного матеріалу (бетону) і арматури. Її формування залежить від рельєфу поверхні арматури, складу матричного матеріалу та режимів його твердіння. В мікроділянках бетону на границі його розділу з арматурою виникає власне поле залишкових деформацій та напружень, яке залежить від конфігурації поверхні взаємодіючих матеріалів та інтенсивності об'ємних деформацій бетону (мал. 1,д).

При появі в конструкції тріщини можна виділити два підходи при оцінці її несучої здатності. Традиційний шлях припускає фіксацію появи тріщин, визначення їх розмірів та внесення корективів до внутрішнього напруженого стану (мал. 1,е). Другий підхід припускає використання положень механіки руйнування. Задача зводиться до вивчення умов розвитку тріщин в гетерогенному матеріалі конструкції. При цьому основна увага приділяється концентрації напружень біля гирла магістральної тріщини (мал. 1,ж).

Дискретна структура конструкції особливо наочно проявляється на рівні структурної неоднорідності "дисперсне в'язуче - дисперсійне середовище". В результаті взаємодії частинок в'язучого, наповнювача (як між собою, так і з дисперсійним середовищем) утворюються структурні блоки різного масштабного рівня - кластери (В.І.Соломатов, В.М.Вировий та ін.). Частина міжкластерних поверхонь розділу здатна перерости в тріщини, що дозволяє подати мікроструктуру КЕМ у вигляді дискретних блоків (мал. 1, и).

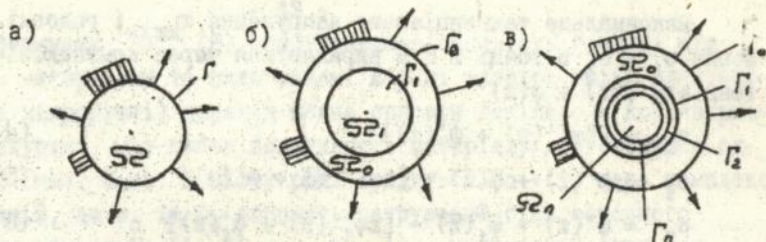
Таким чином, структуру конструкції можна подати різними моделями, вид яких залежить від поставлених цілей аналізу та вивчення їх поведінки при дії експлуатаційних навантажень, а також причин, що пояснюють його. Аналіз показав, що при всій різноманітності прийнятих моделей структури конструкції можна виділити спільний для них структурний елемент - технологічну тріщину. Наявність тріщин в матеріалі конструкції до прикладення на неї експлуатаційних навантажень дозволяє висунути таку робочу гіпотезу:

Початкові (технологічні) тріщини, що виникають і розвиваються в період технологічної переробки матеріалу у виріб, є складовою частиною структури матеріалу до прикладення на конструкції експлуатаційних навантажень та визначають загальну пошкодженість конструкції технологічними дефектами. Кількість і вид технологічних тріщин мають вплив на фізико-механічні характеристики матеріалу; в значній мірі визначають характер розподілу деформацій та напружень між окремими структурними блоками матеріалу конструкції, кінетику накопичення та розвитку експлуатаційних тріщин, несучу здатність та характер руйнування конструкції. Направлена зміна початкової (технологічної) пошкодженості дозволить більш об'єктивно оцінювати властивості матеріалу, змінювати їх в потрібному напрямку та прогнозувати роботу матеріалу в конструкції з врахуванням умов її експлуатації.

2. ОСНОВНІ ПРИЧИНИ ЗАРОДЖЕННЯ І РОЗВИТКУ ДЕФЕКТІВ В ПРОЦЕСІ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ ГРУБОГЕТЕРОГЕННИХ МАТЕРІАЛІВ

Складний характер організації структури та наявність поверхонь розділу між структурними складовими припускає нерівномірний розподіл деформацій ϵ та напружень σ між окремими структурами матеріалу в конструкції при дії на неї експлуатаційних навантажень. Подібний нерівномірний розподіл ϵ та σ , а також концентрація напружень в зонах спадкових тріщин призводить до локальних необернених структурних змін (підростання дефектів, деформування та зміна орієнтування структурних блоків та ін.). В свою чергу, локальна зміна структури викликає зміну властивостей матеріалу в цих областях. В результаті зміни властивостей відбувається перерозподіл деформацій та напружень між новими структурними неоднорідностями. Підструктури матеріалів починають адаптуватися до нових станів шляхом чергової переорганізації як усередині себе, так і зі зміною умов взаємодії з іншими підструктурами. Така переорганізація структур веде, на нашу думку, до фіксування локальних зон зміни властивостей матеріалу в конструкції, що викликає зміну її напружено-деформованого стану.

Для аналізу характеру розподілу напружень на поверхні розділу структурних неоднорідностей, процесу тріщиноутворення необхідно розробити достатньо повну математичну модель. Побудова мо-



Мал. 2. Розрахункова модель однорідного /а/ та неоднорідного /б, в/ матеріалу

делі ускладнена: нелінійним характером роботи матеріалів, що складають композит; нерегулярним розташуванням і складною формою включень; різноманітністю факторів, що породжують напруження; розвитком тріщин. Аналіз результатів, одержаних експериментальним шляхом (методом фотопружності) для композитів регулярної структури, показує, що розподіл напружень в них до появи тріщин досить добре описується лінійною моделлю, яка додержується таких умов: при всіляких деформаціях тріщини між ядрами та матрицею не виникає; центри ваги ядер співпадають з центрами ваги відповідних площин у матриці. За цих умов опис напружено-деформованого стану композиту зручно здійснювати за допомогою теорії функцій комплексного змінного, що розвинуті Н.І.Мусхелішвілі.

Будемо вважати, що для опису напружено-деформованого стану тіла можна використовувати рівняння плоскої задачі теорії пружності (мал. 2, в). Тоді напруження і переміщення у внутрішніх точках елемента виражаються через дві аналітичні функції комплексного змінного $z = x + iy$.

$$\sigma_x + \sigma_y = 4\text{Re}\varphi'(z)$$

$$\sigma - \sigma + 2i\tau = 2[z\overline{\varphi''(z)} + \overline{\varphi'(z)}], z \in \Omega \quad (1)$$

$$2\mu(u - iv) = \chi\varphi(z) - z\overline{\varphi'(z)} - \overline{\varphi(z)} \quad (2)$$

Тут $\text{Re}\varphi(z)$ - матеріальна частина аналітичної функції $\varphi(z)$.

Вказані рівняння при заданих на границі силових факторів можна визначити з рівняння:

$$\varphi(t) + t\overline{\varphi'(t)} + \overline{\varphi(t)} = i \int_0^t (X_n + iY_n) ds, t \in \Gamma, \quad (3)$$

де X_n і Y_n - компоненти зовнішніх навантажень.

Розв'язок вказаної задачі у загальному вигляді приведено у Н.І.Мусхелішвілі.

Максимальне тангенціальне напруження τ_{\max} і головні напруження σ_1 і σ_2 в точці $z \in \Omega$ виражаються через комплексні потенціали $\varphi(z)$ і $\psi(z)$

$$\tau_{\max} = [\bar{z}\varphi''(z) + \psi'(z)] \quad (4)$$

$$\sigma_1 = \varphi'(z) + \bar{\varphi}(\bar{z}) + [z\varphi''(z) + \psi'(z)] \quad (5)$$

$$\sigma_2 = \varphi'(z) + \bar{\varphi}_1(\bar{z}) - [z\varphi_1''(z) + \psi_1'(z)] \quad (6)$$

Так як прийнято, що структура конструкцій складається зі структурних елементів різного масштабного рівня, то можна припустити, що під дією зовнішніх зусиль в матеріалі на одному з рівнів неоднорідностей відбуваються структурні зміни. Це викликає локальну зміну властивостей матеріалу конструкції. Тому можна допустити, що в тілі виникла область матеріалу Ω_1 , властивості якого відрізняються від властивостей матеріалу в області Ω_0 (мал. 2,б). Тоді область Ω_1 можна розглядати як включення в Ω_0 . Напружений стан складеного тіла буде описуватися двома параметрами комплексних функцій $\varphi_0(z)$ і $\psi_0(z)$ ($z \in \Omega_0$) для основного матеріалу і $\varphi_1(z)$ та $\psi_1(z)$ ($z \in \Omega_1$) - для включення.

На границі контакту повинні виконуватися умови рівноваги і умови безперервності переміщень.

$$\bar{\varphi}_0(\bar{t}) + t\varphi_0'(t) + \psi_0(t) = f(t), \quad (t \in \Gamma_0) \quad (7)$$

$$\bar{\varphi}_0(\bar{t}) + t\varphi_0'(t) + \psi_0(t) = \bar{\varphi}_1(\bar{t}) + t\varphi_1'(t) + \psi_1(t), \quad (t \in \Gamma) \quad (8)$$

$$\frac{\chi_0}{\mu_0} \bar{\varphi}_0(\bar{t}) - \frac{1}{\mu_0} [t\varphi_0'(t) + \psi_0(t)] = \frac{\chi_1}{\mu_1} \bar{\varphi}_1(\bar{t}) - \frac{1}{\mu_1} [t\varphi_1'(t) + \psi_1(t)], \quad (t \in \Gamma_1) \quad (9)$$

де χ - пружна константа матеріалу.

$$\chi = \frac{\lambda + 3\mu}{\lambda + \mu} \quad (10)$$

λ і μ - константи Ляме.

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad (11)$$

ν - коефіцієнт Пуассона, E - модуль пружності.

$$G = \mu = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (12)$$

У формулах (7)...(9) припускається наявність границі між основним матеріалом та включенням. В разі плавної зміни властивостей (на мікрорівні) перехід можна описати декількома концентричними контурами, між якими властивості матеріалу допускаються однаковими (мал. 2, в). У цьому разі вводиться $(n + 1)$ пара комплексних функцій, де φ_0 та ψ_0 описують напружений стан основного матеріалу, φ_i та ψ_i ($i = 1, \dots, n - 1$) - напружений стан концентричних областей Ω_i , а φ_n і ψ_n - напружений стан внутрішнього ядра. Всі ці функції можуть бути знайдені з системи рівнянь аналогічно (7)...(9), де умови рівноваги та безперервності записуються для кожного контура.

На границі Γ_1 виникає концентрація напружень, величина яких залежить від співвідношення характеристик матеріалів Ω_1 та Ω_0 . Отже, при досягненні граничних напружень переважний розвиток мають технологічні тріщини, що зародились на границях включень, тобто в місцях зміни властивостей матеріалів.

Враховуючи, що грубогетерогенний матеріал має велику кількість включень, тому, як модель, що описує розподіл напружень в композиті, розглядається безкінцеве ізотропне пружне тіло з регулярним кільцем кругових включень. Включення можна уявити як заповнені пружні ядра з однаковими ефективними характеристиками.

Проведений числовий експеримент дав змогу зробити висновок:

- при твердінні грубогетерогенних матеріалів виникає нерівномірне поле деформацій, яке веде до концентрації напружень на границі включень та появи зародкових тріщин;

- при зовнішніх діях на композиційний матеріал та внаслідок усадочних явищ в ньому на границях включень виникає концентрація напружень. Коефіцієнт концентрації залежить від співвідношення модулів пружності матриці та ядер і від відстані між ядрами.

Розглянемо причини зародження тріщин на мікро- та макрорівні КБМ.

Мікроструктуру КБМ подано як висококонцентровану грубодисперсну ліофобну систему з ліофільною поверхнею розділу фаз. Організація структури таких систем пов'язана не тільки з взаємодією дисперсійного середовища з дисперсною фазою, але й з взаємодією частинок дисперсної фази. Розвинута внутрішня поверхня

розділу веде до появи надлишкової поверхневої енергії та перетворює ліофобну дисперсну систему в термодинамічно несталу. Прагнучи до зниження надлишкової енергії, система самодовільно скорочує міжфазну поверхню розділу шляхом об'єднання частинок дисперсної фази в структурні агрегати-кластери. При цьому утворюються міжкластерні поверхні розділу, здатні трансформуватися в зародкові тріщини (В.І.Соломатов, В.М.Вировий).

Макроструктура КБМ, в значній мірі, визначається адгезійно-когезійними силами зв'язку на границях розділу матричного матеріалу та заповнювачів. Встановлено, що розподіл залишкових деформацій залежить від способів укладки заповнювачів, співвідношення їх розмірів, загальної їх кількості, кінетики набору структурної міцності та розвитку об'ємних деформацій в матричному матеріалі. Топологія заповнювачів як самостійних структурних елементів створює передумови утворення дискретних усадочних осередків, вид і розмір яких визначає пошкодженість та загальну усадку макроструктури. Пошкодженість макроструктури залежить від явищ формозміни на границях розділу матричного матеріалу і заповнювачів та пов'язаної з ними локалізації деформації та напружень зсуву. Фізико-механічні процеси організації зв'язані з фізико-механікою структуроутворення матеріалів на мікрорівні.

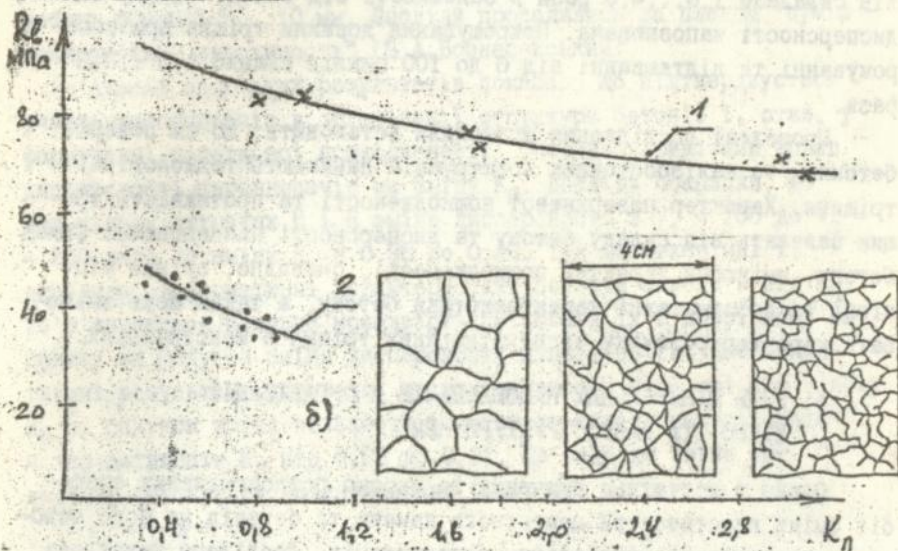
Таким чином, причинами утворення локальних напружень, зародження та розвитку технологічних тріщин в бетонах як грубогетерогенних КБМ можна вважати різницю деформативних характеристик матриці та заповнювачів; кооперативні явища в мікроструктурі дисперсного в'язучого, що веде до утворення періодично організованих структурних блоків та появи границь розділу між ними; взаємодію матричного матеріалу та заповнювачів.

3. ОЦІНКА ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ПОШКОДЖЕНОСТІ ГРУБОГЕТЕРОГЕННИХ КОМПОЗИТІВ

Технологічні тріщини на бетонних зразках та залізобетонних конструкціях виявляли та фіксували за оригінальною методикою (патент № 5008907/33(059304) від 03.07.91 р.). Кількісну оцінку технологічної пошкодженості давали за допомогою коефіцієнта пошкодженості $K = \Sigma T/S$. Запропонований метод дозволяє виявляти та фіксувати як технологічні, так і експлуатаційні

тріщини з шириною розкриття $5 \cdot 10^{-5}$ см та більше і довжиною 5 мм та більше. Метод дозволяє багаторазово (до 20 разів) на тих самих зразках проводити виміри, що дає можливість змінювати пошкодженість в процесі навантаження зразків та конструкцій.

Аналіз характеру пошкодженості зразків з цементного каменю та бетонів різного складу показав, що при різних кількісних показниках зберігається загальна картина розподілу тріщин на поверхні (мал. 3).



Мал. 3. Залежність R_b від K_{II} /а/ та характер поверхневої пошкодженості /б/: 1 - для цементного каменю; 2 - для бетону

Малюнок тріщин являє собою завершені чи незавершені 4-х, 5-ти або 6-тикутники.

Повторність "малюнку" тріщин при зміні його масштабу дозволяє припустити стохастичний характер розподілу технологічних тріщин. Можна прийняти, що завжди знайдеться орієнтована таким чином тріщина, що під дією експлуатаційних навантажень вона буде мати перевагу в своєму розвитку. Так як матеріал (бетон) втрачає свої властивості у зразку чи конструкції, його дефекти, природно,

стають дефектами зразку чи конструкції, причому частина з них орієнтована в найбільш небезпечних напрямках, що завжди веде до зміни властивостей як цементного каменю, так і бетону.

Дослідами встановлено, що при багаторазовому зволоженні та висушуванні, а також при заморожуванні та відтаванні технологічна пошкодженість зростає. Прирошування довжини тріщин при кількості циклів зволоження та висушування від 80 до 110 циклів складало 1,6...4,0 рази в залежності від складу бетону та дисперсності наповнювача. Прирошування довжини тріщин при заморожуванні та відтаванні від 0 до 100 циклів складало 1,6...3,2 рази.

Проведені дослідження дозволили встановити, що на поверхні бетонних та залізобетонних конструкцій виникають технологічні тріщини. Характер поверхневої пошкодженості та протяжність тріщин залежать від складу бетону та дисперсності наповнювача. Склад бетону, змінюючи характер пошкодженості, очевидно, змінює міцнісні та деформативні характеристики бетону, а також може змінювати характер розвитку експлуатаційних тріщин в конструкціях.

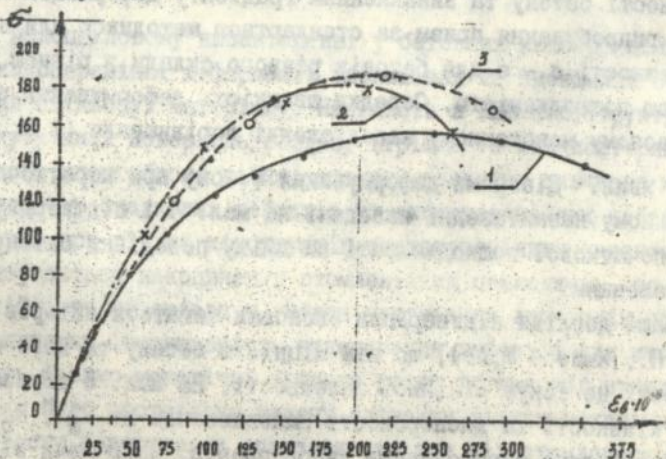
4. РОЛЬ МІНЕРАЛЬНИХ НАПОВНЮВАЧІВ В ОРГАНІЗАЦІЇ МІКРО- ТА МАКРОСТРУКТУРИ КЕМ

Одним з достатньо вивчених та широко розповсюджених способів зміни властивостей цементного каменю та бетонів на його основі є застосування мінеральних наповнювачів. Дослідами Михайлова, Волженського та інш. показано, що, змінюючи мінералогічний склад та кількість мінеральних тонкозмелених добавок, можна керувати екзотермією цементу, його об'ємними змінами в процесі твердіння та кінцевими властивостями цементних композицій (механічними, деформативними характеристиками, корозійною сталістю, стійкістю в різних умовах експлуатації). Крім того, наповнювачі можуть виступати своєрідними демпферами, що стримують розвиток тріщин в матеріалі (П.Г.Комохов). В циклі робіт школи В.І.Соломатова показано, що наповнювачі грають значну роль у фізико-механіці організації структури цементних композицій. Особливо підкреслюється існування оптимальних співвідношень величини частинок цементу та наповнювачів в залежності від природи мінеральної сировини. Це пояснюється впливом частинок наповнювача на розмір кластерних утво-

рень. Так як частина міжкластерних поверхонь розділу перетворюється в зародкові технологічні тріщини, то, змінюючи розмір первинних агрегатів, можна керувати пошкодженістю цементних систем, включаючи бетони.

В наших дослідях застосовувався портландцемент Одеського заводу з $S_{уд.} = 300 \text{ м}^2/\text{кг}$. Як наповнювач служив змелений кварцевий пісок з $S_{уд.} = 100, 200 \text{ и } 300 \text{ м}^2/\text{кг}$, морський пісок та гранітний щебень фракції 5...10 мм. Досліди провадились за планом "суміш - технологія - властивості" (В.А.Вознесенський).

Аналіз одержаних результатів показав, що підтверджується участь наповнювачів в організації структури бетонів і, отже, у формуванні початкової пошкодженості. Особливо примітний вплив дисперсності наповнювачів на зміну K_{II} . Досліди показали, що при рівних витратах Ц і Н зміна дисперсності з $V_1 = 100$ до $V_2 = 200$ веде до зміни K_{II} з 0,36 до 0,46. Так як механічні і, особливо, деформативні характеристики бетонів залежить від K_{II} , то з'являється реальна можливість змінювати їх в потрібному напрямку за рахунок зміни дисперсності наповнювачів. Експериментальні результати показали, що при однаковій міцності при стиску R_D за рахунок зміни кількості і якісного складу наповнювачів можна змінювати K_{II} від 0,26 до 0,31. Це веде до зміни поведінки бетону під навантаженням (мал. 4).



Мал. 4. Діаграма деформування бетону при короточасному монотонному навантаженні. 1 - $K_{II} = 0,41$; 2 - $K_{II} = 0,20$; 3 - $K_{II} = 0,33$

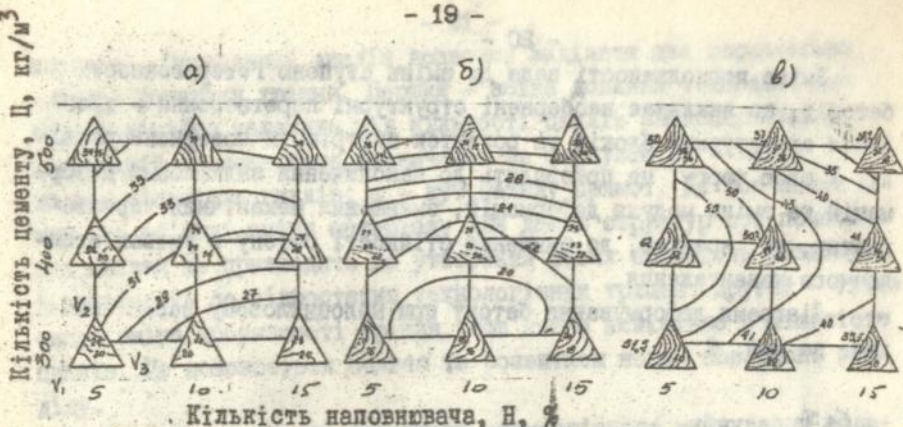
В теперішній час є ряд пропозицій відносно аналітичного опису діаграми $\sigma - \epsilon$ бетону, в яких зроблено спробу узагальнено описати цей зв'язок, орієнтуючись на наявні експериментальні дані (ЕКБ-ФІП, М.Л.Зака, Б.П.Гущі, Н.І.Карпенка, Т.А.Мухамедієва, В.Н.Байкова та ін.).

Запропоновані залежності дають опис характеру деформування бетону при центральному стиску. Експериментальні дослідження В.Я.Бачинського, С.С.Ватагіна, К.А.Мальцева, В.П.Чайки та ін. показують, що діаграма деформування бетону в умовах неоднорідного стиску відрізняється від діаграми при центральному стиску. При цьому, неоднорідний напружений стан впливає як на значення максимального опору бетону, так і на значення деформацій бетону, що відповідають цим напруженням. Багато дослідників прийшли до висновку, що основним фактором, що викликає трансформацію вихідної діаграми бетону в умовах неоднорідного стиску є градієнт деформації по перерізу. Однак, існують і інші дослідні дані /М.К.Бейсембаєв/, які показують, що залежності для центрального стиску краще відображують фактичний стан бетону стиснутої зони. Очевидно, що такі суперечливі відомості пояснюються складністю процесів, що відбуваються при деформуванні бетону.

У зв'язку з наявністю поверхонь розділу, технологічної пошкодженості бетону та виникненням градієнту деформацій нами проведено випробування призм за стандартною методикою для визначення залежності $\sigma - \epsilon$ для бетонів різного складу з різною технологічною пошкодженістю. Середня швидкість деформування при короткочасному монотонному навантаженні дорівнювала $(2,9 \dots 4,9) \times 10^{-5}$ хвил.⁻¹ Діаграми деформування бетону при короткочасному монотонному навантаженні наведені на мал. 4 і підтверджують вплив початкової пошкодженості на зміну поведінки бетону під навантаженням.

Наші досліді підтвердили висновки багатьох авторів (Ахвердов І.Н., Ямлеев У.А.), що між міцністю бетону та його модулем пружності не існує лінійної залежності. На мал. 5 показаний вплив кількості та дисперсності наповнювачів на R_m , R_b та E_b .

Направлене застосування наповнювачів, включаючи відходи інших виробництв (в нашому разі золошлакові відходи від сміттєспалювання), дозволяє в достатньо широких межах змінювати техно-



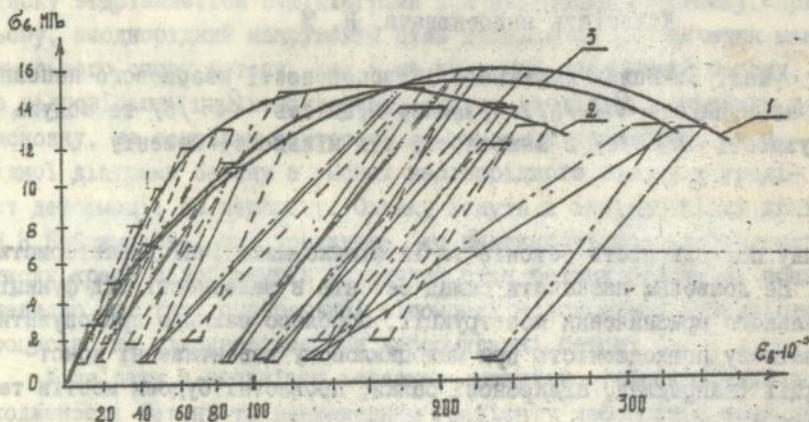
Мал. 5. Вплив кількості і дисперсності кварцевого наповнювача на міцність R_m /а/, призменну міцність R_e /б/ та модуль пружності E_e /в/ в залежності від кількості цементу

гічну пошкодженість бетонів та їх фізико-механічні характеристики. Це дозволяє назначати склад бетонів в залежності від функціонального призначення конструкції. Особливо важливо враховувати початкову пошкодженість при малоцикловому навантаженні конструкції (наприклад, підкранові балки, прольотні будови мостів та т.інш.).

При малоцикловому навантаженні у бетонних конструкціях виникають: знакоперемінні деформації збільшення та зменшення об'єму і зниження стійкості матеріалу. Наявність в КБМ поліструктурної будови внутрішніх поверхонь розділу (тріщин та міжкластерних границь різного масштабною рівня) ставить завдання вивчення механізмів розвитку спадкових дефектів до експлуатаційних небезпечних розмірів при дії на конструкцію знакоперемінних навантажень. В КБМ відбувається накопичення втомленісних пошкоджень, що означає стійкість матеріалу в умовах чергування зовнішніх дій. Значний вплив на інтенсивність накопичення дефектів від втомленості мають фізико-механічні процеси росту тріщин від втомленості. Тому було поставлено задачу вивчення фізико-механічних процесів росту поверхневих спадкових тріщин від втомленості при дії на бетон зовнішнього знакоперемінного впливу, а також задачу підвищення втомленісної стійкості бетону за допомогою спрямованого введення наповнювача.

Зміна пошкодженості веде до зміни ступеню гетерогенності бетонів, що викликає необернені структурні перетворення - дроблення структурних блоків та розвиток внутрішніх поверхонь розділу. У свою чергу, це призводить до накопичення залишкових деформацій та зміни модуля деформацій, зменшення механічних характеристик, та, зрештою, до зниження стійкості бетону в умовах втомлюючого навантаження.

Діаграми деформування бетону при малоцикловому навантаженні див. на мал. 6.



Мал. 6. Діаграма деформування бетону при малоцикловому навантаженні

На основі проведених досліджень встановлено, що інтенсивність накопичення експлуатаційних тріщин від дії малоциклових навантажень залежить від початкової пошкодженості бетону. Зниження впливу початкової пошкодженості спостерігається при введенні наповнювачів з розміром частинок, більших від зерен цементу в 3 рази, при цьому стійкість бетону підвищується в 2...10 разів в залежності від характеру зовнішніх дій.

Знакоперемінні деформації збільшення-зменшення об'єму матеріалу призводять до зміни його пошкодженості за рахунок трансформації технологічних тріщин в експлуатаційні. У процесі збільшення циклів спонтанних деформацій відбувається накопичення по-

шкодженъ. Проведений аналіз дозволив виділити два характерних випадки розвитку тріщин. Перший - зміна довжини технологічних тріщин лінійно залежить від кількості циклів знакоперемінних деформацій та може бути визначеною за формулою $\Delta l = t \alpha n$, де n - кількість циклів; α - кут нахилу прямої. Це пов'язано з тим, що об'ємні зміни матеріалу для даних структур при початкових циклах не призводять до утворення нових поверхонь розділу, а призводять до підростання технологічних тріщин. Другий - інтенсивна зміна протяжності тріщин, пов'язана нелінійно з кількістю циклів. Це пояснюється появою та розвитком нових поверхонь розділу.

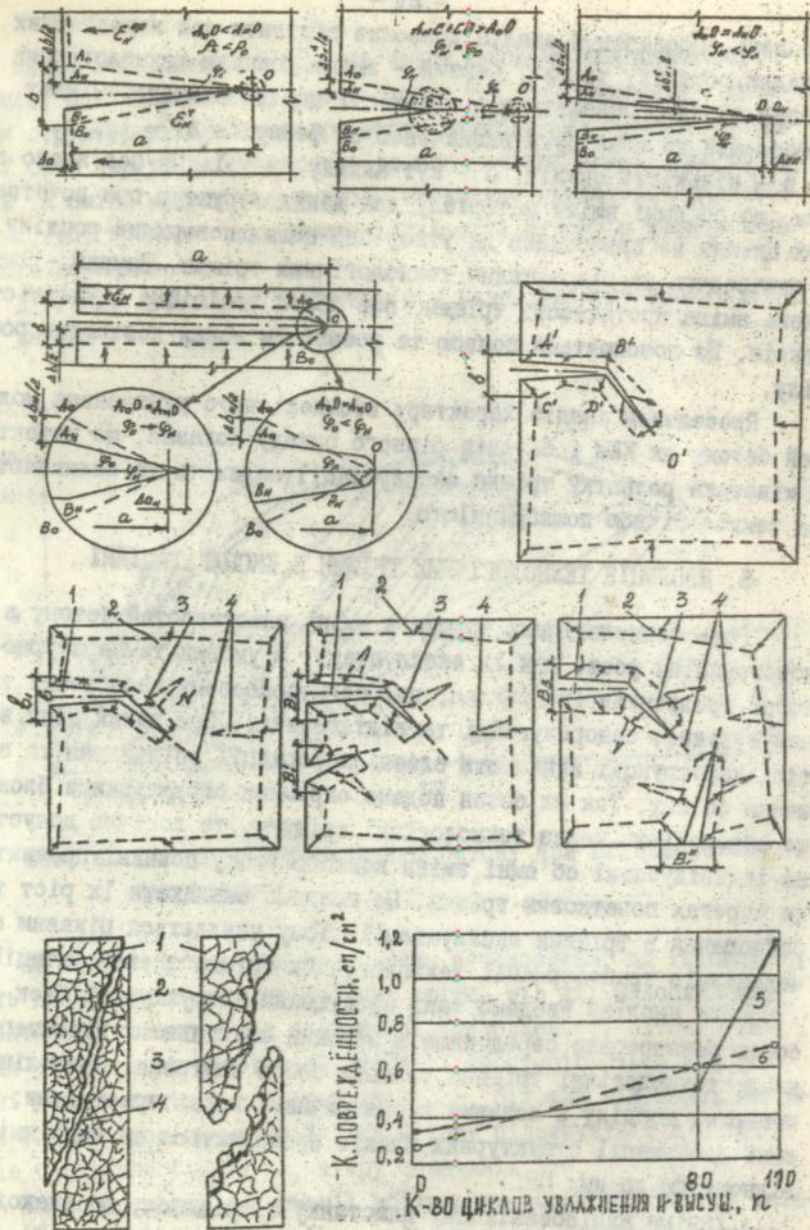
Проведений аналіз характеру втомленісного руйнування моделей бетону як КЕМ і бетонів різного складу показав, що характер і кінетика розвитку тріщин експлуатації залежать та визначаються технологічною пошкодженістю.

5. ЕВОЛЮЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ТРІЩИН В ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ

Роль технологічних тріщин в зміні властивостей бетону в конструкціях росте при їх експлуатації в умовах температурно-вологіх градієнтів (наприклад, при багаторазовому зволоженні та висушуванні, заморожуванні та відтаванні). При таких діях в тілі конструкції виникають власні деформації збільшення та зменшення об'єму. Так як бетон подано окремими структурними блоками, що взаємодіють через технологічні тріщини, то логічно допустити, що індивідуальні об'ємні зміни кожного блоку повинні проявитися на берегах початкових тріщин. Це повинно викликати їх ріст та перетворення в тріщини експлуатації. Тому уявляється цікавим аналіз механізмів трансформації технологічних тріщин в експлуатаційні.

Для аналізу введемо такі припущення: структурний блок являє собою безперервне середовище з певними ефективними характеристиками; технологічні тріщини являють собою внутрішні прямолінійні поверхні розділу з певними геометричними характеристиками; об'ємні деформації структурних блоків проявляються на зовнішніх по відношенню до них ПР.

Уявімо напівбезкінцеву пластинку з тріщиною, що знаходиться під дією об'ємних деформацій з перемінним знаком (мал. 7). При збільшенні об'єму на береги тріщини будуть діяти рівномірно розподілені деформації ϵ_n^T .



Мал. 7. Зміна пошкодженості при знакоперемінних деформаціях

При дії деформацій, що виникли при цьому, береги тріщини починають зближуватися на значення Δb_n . При цьому положення гирла тріщини не зміниться. Так як на берег діє рівномірно-розподілена деформація, то можна стверджувати, що в матеріалі будуть виникати одночасно пластичні ϵ_{pl} та пружні ϵ_{el} деформації. Пластичне деформування мікроструктури відбувається в результаті змикання тріщини на певних етапах збільшення об'єму. Якщо об'ємні деформації $\Delta V_n > V_T$, то береги тріщини зустрічаються один з одним. Ділянка тріщини починає працювати спільно з матеріалом, та пружні деформації тут переважають над пластичними.

При зменшенні об'єму мікроструктури до значень $V_0 - \Delta V_y$ (V_0 - початковий об'єм матеріалу), рівномірно розподілена на берегах тріщини деформація усадки викликає її розкриття. Деформації берегів при розмиканні тріщини до її ефективного початкового розкриття b можна віднести до пружної частини усадочних деформацій. При цьому настає період пластичного деформування. В силу прийнятих припущень тріщина не може викривити свої береги, а матеріал змінити свої середні характеристики. Тому у випадку $\Delta V_y > V_T$ відбувається збільшення довжини тріщини на значення Δa_y (мал. 7). Одночасно збільшується ширина її розкриття Δb_y . Абсолютні значення Δb_y і Δa_y залежать від початкових b_0 і a_0 і деформацій усадки, що проявляються на берегах тріщини $\Delta \epsilon_y$. Між збільшенням ширини розкриття тріщини та прирощуванням її довжини існує залежність $\Delta a_y = \Delta b_y : 2 \operatorname{tg}(\varphi/2)$, де φ - залежить від геометрії тріщини.

Кожний наступний цикл знакоперемінних деформацій буде викликати прирощування довжини тріщини Δa_y , яке визначається її початковими геометричними розмірами.

Якщо прийняти рівномірність усадочних деформацій від циклу до циклу, то довготривалість мікроструктури в умовах малоциклової втоменості або кількість циклів N буде залежати від початкової довжини тріщини a_0 та ширини її розкриття b_0 .

Проведений аналіз показав, що довготривалість бетону при прийнятих допущеннях визначається початковою тріщиною, а також значенням і кількістю знакоперемінних деформацій. У цьому випадку втоменісна довготривалість зразку залежить від швидкості росту тріщин da_y/dN . Таку тріщину можна уявити як магістральну та

звести стійкість матеріалу в умовах знакоперемінних деформацій до швидкості росту магістральної тріщини.

Ускладнимо задачу. Уявімо бетон як безперервне середовище, розділене криволінійною тріщиною (див. мал. 7). Для аналізу поведінки поверхневих тріщин прийнята плоска модель. Крім того, виходили з припущення, що деформації, що виникають, проявляються як на зовнішніх, так і на внутрішніх поверхнях розділу (ПР). Тріщину можна описати довжиною кожного берега, радіусом гирла та радіусом повороту тріщини, шириною її розкриття.

Приймемо, що процес починається зі зменшення об'єму матеріалу. В результаті одержано розподіл відносних деформацій зовнішніх та внутрішніх ПР структурного блоку. В силу асиметричності розташування тріщини деформації кожної точки переміщуються по власній траєкторії. При аналізі початкова ширина розкриття початкової тріщини практично не грає ролі, тому що метою аналізу була зміна прирошування ширини розкриття.

Різноманітні переміщення кожної точки та різна величина переміщень ведуть до індивідуальної формозміни берегів тріщини та до загального збільшення ширини її розкриття. При цьому можливі, на нашу думку, два рівноймовірні випадки подальшого розвитку тріщини. Перший випадок може бути зв'язаний з порушенням суцільності матеріалу на березі BO в зоні максимальної формозміни (точка N). В результаті порушення суцільності може утворитися нова тріщина з шириною розкриття, рівною $B'O' - BO = \Delta b$.

Другий випадок може виникнути при збільшенні довжини технологічної тріщини на величину Δa . Це може бути зв'язано з тим, що різноспрямовані деформації на протилежних берегах BO і DO можуть призвести до концентрації деформацій і напружень біля гирла тріщини та її росту на величину Δa .

Таким чином, деформації усадки сприяють збільшенню пошкодженості прийнятої моделі бетону. Якісна відміна при збереженні загальної однакової зміни пошкодженості полягає в тому, що в першому випадку відбувається накопичення об'ємних пошкоджень без зміни протяжності технологічної тріщини. У другому випадку зміна пошкодженості зв'язана з ростом початкової тріщини. Як в тому, так і в іншому випадку зміна пошкодженості зв'язана з початковою пошкодженістю матеріалу.

Аналогічний аналіз проведено для процесу збільшення об'єму матеріалу, який показав, що, як при зменшенні об'єму, так і при збільшенні об'єму пошкодженість матеріалу може збільшуватися шляхом утворення нових тріщин або за рахунок росту існуючих.

Зміна початкової пошкодженості матеріалу припускає існування у виділеному структурному блоці не однієї, а декількох тріщин. Тому цікаво провести аналіз поведінки цих тріщин при знакоперемінних деформаціях структурного блоку. У прийнятій моделі (див. мал. 7) введено ще одну тріщину, що дозволяє збільшити коефіцієнт пошкодженості з $K_{II} = 0,1$ до $K_{II} = 0,28$ (мал. 7). Збільшення початкової пошкодженості веде до зміни деформацій берегів тріщини АВОДС. При цьому протяжність берегу ВО збільшується, що створює передумови утворення на ВО нової тріщини.

У випадку, якщо збережеться суцільність берегу ВО, можуть розкритися береги тріщини під дією усадочних деформацій, що приведе до її росту. Таким чином, відбувається збільшення пошкодженості матеріалів за рахунок збільшення довжини тріщин і АВОДС.

Проведені експерименти підтвердили наявність 2-х механізмів накопичення дефектів при багаторазовому зволоженні та висушуванні. Існує склад бетонів з незначним накопиченням дефектів та склад бетонів, коефіцієнт пошкодженості яких може змінюватися більш, як в чотири рази. При такому збільшенні пошкодженості матеріалу спостерігається його об'ємне руйнування. Поява експлуатаційних тріщин веде до зміни механічних характеристик матеріалу та, в результаті, до зниження стійкості бетону. Стійкість визначалась коефіцієнтом стійкості, що дорівнює відношенню призначених міцностей та модулів пружності після визначеної кількості циклів до характеристик бетону еквівалентного віку.

В результаті проведених досліджень можна назначати склад бетонів, стійких при умовах зволоження та висушування. При цьому слід звертати увагу на додержання оптимальної дисперсності наповнювача. Застосування оптимальних наповнювачів веде до зниження початкової пошкодженості, ускладнює розвиток втомленісних тріщин та сприяє підвищенню стійкості бетону.

Аналогічний вплив кількості та дисперсності наповнювачів спостерігається при позмінному заморожуванні та відтауванні бето-

ну. Досліди показали, що протяжність поверхневих тріщин та коефіцієнт пошкодженості зростають зі збільшенням кількості циклів заморожування та відтавання. Це веде до зміни механічних характеристик та, зрештою, до зниження стійкості бетону. Як і при зволоженні і висушуванні, необхідно дотримуватися оптимальної дисперсності, відхилення від якої може привести до зниження стійкості майже в 2 рази.

На нашу думку, наповнювачі мають вплив не тільки на формування початкової пошкодженості бетону, але й визначають умови розвитку фронту тріщини в готовому матеріалі. Згідно уявлень Ленга, наповнювачі можуть виступати або своєрідним "бар'єром" на шляху руху фронту тріщини або сприяти його швидкому просуванню. Крім того, кінетика розвитку тріщин залежить від того, чи прикладається зовнішнє механічне навантаження, чи розвиваються в матеріалі власні об'ємні зміни або в матеріалі присутні елементи, які викликають внутрішні напруження.

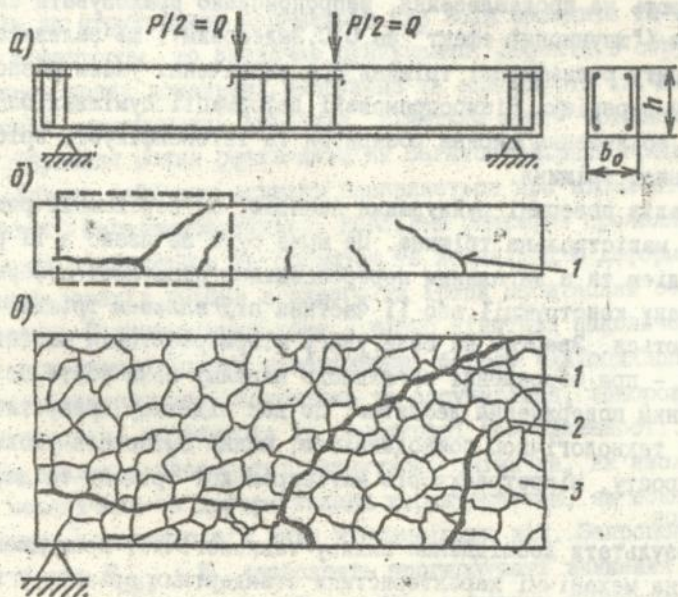
Аналіз показує, що в залежності від місця та орієнтування тріщин змінюється характер розподілу деформацій усадки та набухання на берегах базової тріщини. Створюються реальні передумови порушення суцільності матеріалу та збільшення пошкодженості бетону і, отже, конструкції, за рахунок створення експлуатаційних тріщин на берегах технологічних. Таким чином, керування початковою пошкодженістю бетону дозволяє прогнозувати пошкодженість конструкції експлуатаційними тріщинами.

6. ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ПОШКОДЖЕНОСТІ НА РОБОТУ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ

Відомо, що присутність тріщин в бетонних елементах може викликати миттєве руйнування при експлуатаційних навантаженнях. Наявність технологічних тріщин збільшує можливість миттєвого руйнування, особливо для бетонів високих класів. На відміну від бетону, в залізобетонних конструкціях припускається присутність технологічних та експлуатаційних тріщин, а також їх зріст та розкриття до визначених розмірів. Запропоновано методи розрахунку залізобетонних елементів з тріщинами, що базуються на моделі, яка складається з блоків, розділених тріщинами та зв'язаних між собою стиснутою зоною та розтягнутою арматурою.

Для вивчення впливу технологічної пошкодженості на роботу конструкцій було випробовано залізобетонні балки та плити без попереднього напруження з різними схемами армування при різних силових діях з метою одержання характеру руйнування по вертикальному та похилому перерізам та вивчення роботи елементів з різною технологічною пошкодженістю під навантаженням.

Після твердіння було визначено характер розподілу спадкових поверхневих тріщин (мал. 8). Малюнок технологічних тріщин на поверхні залізобетонних конструкцій не відрізняється від малюнку тріщин на зразках із цементного каменю та бетону, що свідчить про типовість технологічної пошкодженості композиційних матеріалів та конструкцій на неорганічних в'язучих. При цьому контролювали момент появи та розвитку експлуатаційних тріщин під дією зовнішнього навантаження, відстань між тріщинами та ширину їх розкриття,



Мал. 8. Вплив технологічної пошкодженості на характер руйнування конструкції: а/ схема армування балки; б/ характер руйнування балки; в/ вплив початкової пошкодженості матеріалу на траєкторії розвитку похилих тріщин; 1 - похила тріщина; 2 - технологічні тріщини; 3 - структурний блок

прогини балок та інтенсивність акустичної емісії (АЕ), визначали руйнівне навантаження.

Аналіз характеру тріщиноутворення показав, що вертикальні та похилі тріщини, що виникають під дією зовнішнього навантаження, проходять по границях розділу структурних блоків (повторюють конфігурацію технологічних тріщин). Це підкреслює існування ослабленої зони на границях розділу між структурними блоками. Магістральна тріщина проходить також по границях розділу та ділить конструкцію на блоки. Характер руйнування дозволяє припустити, що під дією зовнішніх навантажень відбувається перерозподіл деформацій та напружень між окремими структурними блоками. При цьому, в залежності від їх загального та місцевого розподілу, окремі блоки можуть деформуватися або змінювати орієнтацію так, що частина границь розділу змикається. Це може призвести до ефекту зачеплення суміжних берегів тріщини та сповільнити її ріст. Так, для плит, що працюють на продавлювання, запропоновано враховувати сили зачеплення ("шпунковий ефект" за О.С.Залесовим), що залежать від коефіцієнту рельєфності тріщини при визначенні умови рівноваги по похилому перерізу. Різноспрямовані деформації суміжних блоків ведуть до збільшення ширини розкриття та інтенсифікують зріст магістральної тріщини.

Аналіз поверхні руйнування показав, що переважний розвиток має магістральна тріщина. Це може бути зв'язано з її релаксуючою дією та з загальним перерозподілом напружено-деформованого стану конструкції або її частини під впливом тріщин, що розвиваються. Звертає на себе увагу мікротраєкторія магістральної тріщини - при збереженні загального напрямку вона росте по технологічним поверхневим дефектам. Це дає підставу припустити, що, керуючи технологічною пошкодженістю, можна змінювати умови, кінетику росту, мікротраєкторію магістральної тріщини та деформації балок.

Результати дослідження впливу технологічної пошкодженості бетону на механічні характеристики стандартних зразків у вигляді аналітичних залежностей для міцності, модуля пружності та граничних деформацій були покладені в основу уточнення ортотропної моделі деформування бетону та залізобетону на випадок впливу початкової пошкодженості. Цей фактор враховувався трансформацією діа-

грам деформування по головних напрямках змінює координат вершини та кута нахилу дотичної в початку координат. Уточнені залежності були включені до складу обчислювального комплексу "FOCUS-PC", призначеного для розрахунку залізобетонних конструкцій у фізично нелінійній постановці методом кінцевих елементів (С.Ф.Клованич). Здійснено розрахунок статично визначених балок при різних значеннях пошкодженості матеріалу. Зіставлення розрахункових та експериментальних значень міцності і деформативності балок свідчить про достатню надійність запропонованого методу врахування технологічної пошкодженості бетону в їх роботі.

7. РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ВРАХУВАННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ПОШКОДЖЕНОСТІ БЕТОНУ НА РОБОТУ КОНСТРУКЦІЙ

Проведені експериментально-теоретичні дослідження дозволили встановити, що бетонні і залізобетонні конструкції мають технологічну пошкодженість різного масштабного рівня. Присутність дефектів як структурних параметрів для всіх випадків та на всіх етапах є фактором, що визначає руйнування. Дефекти в структурах викликають появу локальних напружень та можливість їх часткової релаксації, накопичення дефектів, кінетики росту тріщини і т.інш.

Руйнування можна розглядати як багатостадійний процес. Багатостадійність найбільш яскраво проявляється при втомленісному руйнуванні. Багатомасштабність найбільш рельєфно проявляється при впливі мікротріщин на розвиток та локалізацію деформацій та поетапний перехід тріщин з одного на інший масштабний структурний рівень. Підтвердження тому - різна кінетика накопичення дефектів при втомленісному навантаженні бетону (малоциклове завантаження; багаторазове зволоження та висушування, заморожування та відтавання) як функція їх початкової пошкодженості.

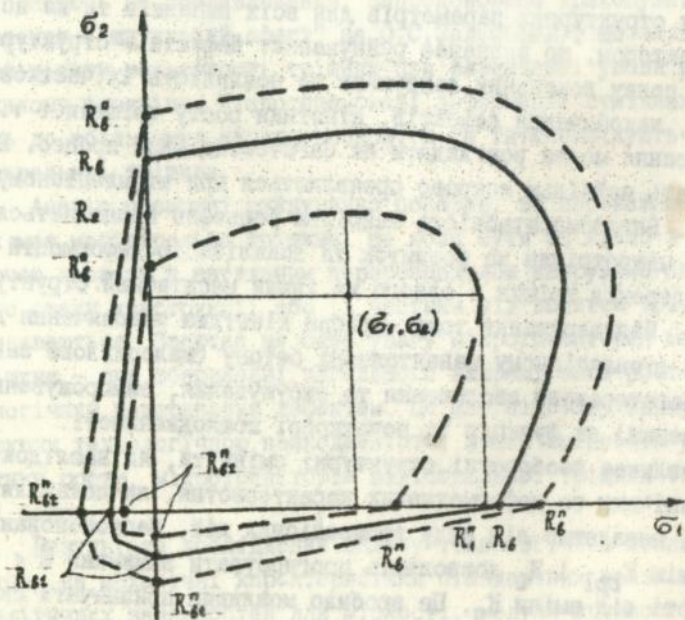
Це викликає необоротні структурні зміни та, як наслідок, зміну механічних та деформативних характеристик, як показали дослідження, незалежно від виду втомленісних дій. Запропоновані залежності між E_{brl} і K_{II} дозволяють прогнозувати зниження $E < 0,8E_b$ в залежності від зміни K_{II} . Це зробило можливим призначати склад бетонів з мінеральними наповнювачами з заданими параметрами технологічної пошкодженості, здатними протистояти зовнішнім діям. При цьому наповнювачі виступають як в ролі структуроутворю-

вчих елементів, так і в ролі "бар'єрів" на шляху руху тріщин. Тому важливо враховувати їх подвійний ефект в залежності від умов роботи конструкцій.

Наявність початкової пошкодженості та участь наповнювачів у зміні кінетики розвитку тріщин експлуатації ϵ , на даному етапі досліджень, зв'язують ланков між технологічними факторами виготовлення залізобетонних конструкцій з потрібними параметрами K_{II} та конструктивними особливостями врахування зміни K_{II} при експлуатації.

Розрахунок залізобетонних конструкцій при одноосному напруженому стані слід провадити з врахуванням реальної діаграми деформування бетону (мал. 4) ($t\alpha = E_{bi}$ - модуль пружності бетону без врахування технологічної пошкодженості; $t\alpha_1 = E_{bi}^{II}$ - модуль пружності пошкодженого бетону).

При двохосному напруженому стані визначення міцності бетону по головних напрямках (мал. 9) провадиться так



Мал. 9. Міцність бетону по головних напрямках при двохосному напруженому стані

Модель деформування бетону

$$\{\sigma\} = [D]\{\epsilon\}$$

$$D = \frac{1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \begin{bmatrix} E_{b1} & \nu_{12}E_{b2} & 0 \\ \nu_{21}E_{b1} & E_{b2} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{b12}(1 - \nu_{12}\nu_{21}) \end{bmatrix};$$

$$\nu_{12}E_{b2} = \nu_{21}E_{b1}$$

$$\sigma_i = R_i^{\Pi} \frac{K\eta_i}{1 + A\eta_i + B\eta_i^2 + C\eta_i^3}$$

$$\eta = \frac{\epsilon_i^0}{\epsilon_{ri}^{\Pi}}; K = \frac{E_b^{\Pi} \epsilon_{ri}^{\Pi}}{R_i^{\Pi}}$$

$$C = K(K_{\sigma} - 1)/(K_{\epsilon} - 1)^2 - \frac{1}{K_{\epsilon}}$$

$$B = 1 - 2C; A = C + K - 2; K_{\sigma} = \frac{R_i^{\Pi}}{\sigma_{ui}}; K_{\epsilon} = \frac{\epsilon_{ui}^{\Pi}}{\epsilon_{ri}^{\Pi}}$$

$$\nu_{ij} = \frac{\nu_b^{\Pi}}{E_{bi}^{\Pi}}; G = \frac{E_{b1}^{\Pi} E_{b2}^{\Pi}}{E_{b1}^{\Pi} + E_{b2}^{\Pi} (1 + 2\nu_{12})}$$

Еквівалентні одноосні деформації

$$\epsilon_1^0 = \epsilon_1 - \nu_{21}\epsilon_2; \epsilon_2^0 = \epsilon_2 - \nu_{12}\epsilon_1.$$

Експериментальні дослідження упроваджені в практику проектування залізобетонних балок та плит, а також удосконалення технології підбору складу бетонів.

Проведені дослідження дозволяють прийти до висновку, що надійна робота будівельних конструкцій визначається не тільки їх конструктивними параметрами, а й спадковими (технологічними) факторами. Тому перспективним уявляється подальше зближення технологічних (добір вихідних складових та призначення режимів виготовлення) і конструктивних (призначення розмірів, вибір системи армування) задач. Це дозволить найбільш повно реалізувати властивості матеріалів в кожній конкретній конструкції і забезпечити їх функціонування в нормований період експлуатації.

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ

1. Прогнозування безвідмовної роботи бетонних та залізобетонних виробів і конструкцій при різних режимах експлуатації можна підвищити при умові врахування в їх роботі початкової (технологічної) пошкодженості матеріалу. Результати проведеної роботи показують можливість враховувати пошкодженість конструкції при оцінці її деформативних характеристик, зародженні та розвитку експлуатаційних тріщин, зміні властивостей матеріалу в процесі експлуатації, а також можливість керувати початковою пошкодженістю в залежності від функціонального призначення конструкції. Це робить можливим назначати склад бетонів і технологічні умови їх переробки у виробі з врахуванням особливостей впливу експлуатаційних навантажень.

2. Проведено аналіз структурних рівнів конструкцій. Це показало, що структуру конструкції можна подати різними моделями, від яких визначається поставленими задачами аналізу. При цьому моделі можуть базуватися на уявленні матеріалу у вигляді суцільного або дискретного (блочного) середовища. Опис структури конструкції як складної системи з ієрархічною співвідлеглистю окремих структурних (підсистемних) елементів дозволяє виділити найбільш важливі елементи, що відповідають за несучу здатність окремих частин і конструкції в цілому, дозволяє розкрити роль матеріалу в її роботі, визначити шляхи проектування матеріалу для конкретної конструкції.

3. Описані основні причини зародження та розвитку дефектів в процесі структуроутворення гетерогенних матеріалів типу бетонів. На основі розроблених методів запропоновано кількісно оцінювати пошкодженість готового матеріалу спадковими (технологічними) дефектами. З використанням теорії функцій комплексного змінного (для моделі матеріалу у вигляді суцільного середовища) описано механізм формування напруженого стану в матриці як для поодинокого, так і для системи групових включень. Описано поведінку матриці та включень для моделі матеріалу у вигляді структурних блоків при структуроутворенні та експлуатації матричного матеріалу. Проведені дослідження складають основу для направленного створення матеріалу з мінімальною пошкодженістю техно-

гічними дефектами.

4. Встановлено, що одним з ефективних прийомів направленою структуроутворення матричного матеріалу бетонів з метою зниження його пошкодженості є застосування мінеральних наповнювачів. Зміна кількості та дисперсності наповнювачів дозволяє одержувати бетони однакової міцності з широко регульованими деформативними характеристиками (наприклад, для класу бетонів В25 модуль пружності може змінюватися від 20 до 44 МПа). Зміна деформативних характеристик бетонів одного класу дозволяє визначати склад бетонів в залежності від особливостей їх роботи в конструкції.

5. Вивчено вплив технологічної пошкодженості на модуль пружності, модуль деформацій та граничні деформації бетонів різних класів. Це дозволило вивчити вплив технологічної пошкодженості на міцнісні та деформативні характеристики бетонів. Показано спадкову залежність накопичення пошкоджень та стійкості (при короткочасних малоциклових навантаженнях, зволоженні та висушуванні, заморожуванні та відтаванні) бетонів від їх початкової пошкодженості. В результаті проведених досліджень показано, що інтенсивність накопичення експлуатаційних тріщин залежить від характеру початкової пошкодженості. При направленому змінюванні технологічних тріщин стійкість бетонів при малоциклових навантаженнях збільшується в 6...10 разів.

6. Проведені дослідження дозволили встановити, що технологічні тріщини обумовлюють кінетику розвитку та характер експлуатаційних тріщин. Встановлено, що під дією експлуатаційних навантажень змінюється не тільки загальна (технологічні + експлуатаційні тріщини) пошкодженість матеріалу, а й характер експлуатаційних тріщин. Взагалі можна виділити два характерних види експлуатаційних тріщин в залежності від способів навантаження: 1 - при дії стаціонарних навантажень експлуатаційні тріщини розвиваються по траєкторії технологічних, при цьому рельєф таких тріщин визначається "малюнком" технологічних тріщин; 2 - в разі втомленісного навантаження відбувається дроблення структурних блоків на більш дрібні (процес накопичення залишкових деформацій) з наступним об'єднанням міжкластерних поверхонь розділу в експлуатаційні тріщини. В тому та іншому випадках зберігається залежність експлуатаційних тріщин від початкової пошкодженості

матеріалу технологічними дефектами. Це дозволяє направлено на-значати склад бетону та технологічні умови його переробки у ви-ріб в залежності від особливостей експлуатаційних дій на конст-рукцію. Направлене керування початковою пошкодженістю бетону до-зволяє підвищувати його стійкість при зміні температурно-воло-гого режиму експлуатації в 2...3 рази.

7. Встановлено вплив технологічної пошкодженості бетону на роботу конструкцій. Експериментально-теоретичні дослідження показали, що при перерозподілі внутрішніх зусиль в конструкції за рахунок експлуатаційних дій відбувається зміна структури окре-мих об'ємів матеріалу. Аналіз показав, що подібна зміна структу-ри може бути зв'язана з різною інтенсивністю переростання техно-логічних тріщин в експлуатаційні. Це сприяє розвитку анізотро-пії деформативних властивостей окремих об'ємів матеріалу, що ви-кликає перерозподіл внутрішнього напружено-деформативного ста-ну і веде тим самим до поглиблення структурних змін. Виникає своєрідна самоініціатива процесу руйнування, що супроводжується поетапною зміною структури шляхом розвитку мережі експлуатацій-них тріщин з поетапним перерозподілом деформацій як за рахунок зміни властивостей матеріалу, так і за рахунок росту старих та появи нових тріщин. Визначення складу бетонів з заданими пара-метрами початкової пошкодженості в залежності від особливостей експлуатації конструкції знижує анізотропію властивостей матеріа-лу в конструкції, дозволяє керувати кінетиком накопичення пошкод-жень і, отже, знижує флуктуацію властивостей бетону. Це сприяє проявленню потенціальних властивостей бетону в конструкції, що збільшує надійність її експлуатації. Траєкторію тріщин обумовле-но не тільки головними напруженнями, а й характером початкової пошкодженості конструкцій.

8. Розроблено рекомендації щодо врахування технологічної по-шкодженості бетону в роботі конструкцій. Запропоновано врахову-вати $K_{\text{п}}$ для діаграми деформування бетону та умов міцності при одноосному та двохосному напруженому стані. Вірогідність реко-мендацій підтверджується розрахунком конструкцій та зіставлен-ням з даними експериментів при різній початковій пошкодженості.

Положення дисертації опубліковано в 77 роботах, основні з яких такі:

1. Соломатов В.И., Дорофеев В.С., Выровой В.Н., Сиренко А.В. Композиционные строительные материалы и конструкции повышенной материалоемкости. - Киев: Будівельник, 1991. - 144 с.
2. Дорофеев В.С. Технологическая поврежденность бетона и ее влияние на работу конструкций. - Одесса, 1993. - 52 с.
3. Дорофеев В.С., Карпук В.М., Шупта В.П. Восстановление и усиление конструкций при техническом перевооружении предприятий. - К.: УМК ВО, 1991. - С. 24-29.
4. Клованич С.Ф., Дорофеев В.С., Шкуровский В.М. Проектирование железобетонных безкаркасных зданий с учетом сейсмических воздействий. - К.: ИСИО, 1993. - 56 с.
5. Выровой В.Н., Дорофеев В.С., Макарова С.С. Технологическая поврежденность и ее влияние на модуль упругости строительных композитов//Сб. научн. тр. шестой национальной конференции по механике и технологии композиционных материалов Болгарской академии наук. - София, 1991. - С. 200-203.
6. Кушнарера Г.А., Дорофеев В.С. Трещиностойкость железобетонных балок из бетонов на карбонатных заполнителях при многоцикловых нагружениях//Резервы прочности бетонных и железобетонных конструкций: Сб. научн. тр. - К., 1989. - С. 76-81.
7. Дорофеев В.С. Влияние технологической поврежденности на диаграмму деформирования и условия прочности при одноосном и двухосном напряженном состоянии//Труды Республиканского научно-технического семинара "Физико-технические и технологические особенности получения малоцементных строительных материалов и конструкций". - Киев:Общество "Знание", 1992. - С. 14.
8. Дорофеев В.С. Роль технологии в получении композиционных строительных конструкций оптимальной структуры//Материалы международной научно-технической конференции "Повышение долговечности и эффективности работы конструкций сельскохозяйственных зданий и сооружений". - Челябинск, 1992. - С. 15-16.
9. Соломатов В.И., Выровой В.Н., Дорофеев В.С., Шупта В.П. Модель процесса трещинообразования в композитных материалах с технологической поврежденностью//Работоспособность строительных материалов на основе и с применением местного сырья и отходов промышленности: Межвузовский сборник. - Казань.- 1991.- С.24-30.
10. Дорофеев В.С. Технологическая наследственность компози-

ционных строительных материалов и конструкций//Серия "Новое в науке и технике". - Киев: УМК ВО, 1992. - 51 с.

11. Дорофеев В.С. Зависимость модуля деформации бетона от его технологической поврежденности //Сб.научн.-исслед.тр. "Ресурсосберегающие решения в производстве строительных материалов и конструкций". - Одесса, 1992. - С. 56-59.

12. Дорофеев В.С. Расчет плит на продавливание на основе блочно-связевой модели//Сб.научн.-исслед.тр. "Ресурсосберегающие решения в производстве строительных материалов и конструкций". - Одесса, 1992. - С. 112-117.

13. Соломатов В.И., Дорофеев В.С., Выровой В.Н. Основы композиционных строительных материалов. - Харьков: ХИИГХ, 1990. - 52 с.

14. Дорофеев В.С., Абдалла Х.Х. Несущая способность железобетонных балок по наклонным сечениям при действии повторных нагрузок/Информационный листок. - Одесса: УкрНИИТИ, 1987. - № 87-036. - 4 с.

15. Дорофеев В.С., Хаджи Х.Р. Методика расчета железобетонных балок по наклонным сечениям из бетонов на пористых заполнителях при малых пролетах среза. - М.:ВНИИИС, 1987. - № 7617. - Вып. 5. - 10 с.

16. Дорофеев В.С., Майстренко Ф.М. и др. Зола-унос от сжигания твердых бытовых отходов Крымского термического завода для керамических кирпича и камней. Технические условия. ТУ 204 УССР 265-88. - 12 с.

17. Дорофеев В.С., Майстренко Ф.М. и др. Золошлаковая смесь от сжигания твердых бытовых отходов Крымского термического завода для керамических кирпича и камней. Технические условия. ТУ 204 УССР 266-88. - 12 с.

18. Кушнарера Г.А., Дорофеев В.С. Прогобы железобетонных балок из бетонов на карбонатных заполнителях при действии многократно повторяющихся нагрузок//Материалы Всесоюзной науч.-техн. конф. "Повышение долговечности сельскохозяйственных зданий и сооружений". - Челябинск, 1990. - С. 94-97.

19. Соломатов В.И., Выровой В.Н., Залесов А.С., Дорофеев В.С. Технологическая поврежденность композиционных строительных материалов и конструкций/Транспортное строительство. - № 7. - 1990.

- С. 39-40.

20. Выровой В.Н., Дорофеев В.С., Шеховцов И.В., Макарова С.С. Проблемы эффективного использования композиционных строительных материалов в конструкциях//Сб.научн.тр. "Экспериментально-статистическое моделирование и оптимизация композиционных материалов". - Киев: УМК ВО, 1990. - С. 13-24.

21. Дорофеев В.С., Шупта В.П. Численные исследования концентрации напряжений в композиционных материалах//Сб.научн.тр."Экспериментально-статистическое моделирование и оптимизация композиционных материалов". - Киев: УМК ВО, 1990. - С. 61-67.

22. Выровой В.Н., Дорофеев В.С., Макарова С.С. Технологическая поврежденность и ее влияние на модуль упругости строительных композитов//Труды шестой национальной конференции по механике и технологии композиционных материалов. - София: БАН, 1991. - С. 200-203.

23. Коваль С.В., Дорофеев В.С. Методология и опыт статистической оптимизации качества композитов, рекуперирующих отходы промышленности//Сб.научн.тр. пятой национальной конференции по механике и технологии композиционных материалов Болгарской академии наук. - София, 1988. - С. 778-782.

24. Дорофеев В.С., Жудина В.И., Заколюдяная О.В. Использование зол и шлаков от сжигания твердых бытовых отходов/Строительные материалы и конструкции. - № 4. - 1987. - С. 15-18.

25. Выровой В.Н., Дорофеев В.С. Технологическая механика композиционных материалов. - Киев: Общество "Знание" Украины, 1991. - 19 с.

26. Дорофеев В.С., Выровой В.Н., Сайед Бассем. Влияние технологической поврежденности на характер разрушения железобетонных балок сельхоззданий//Материалы всесоюзной научно-технической конференции "Использование вторичных ресурсов и местных материалов в сельском строительстве". - Челябинск, 1991. - С. 15-16.

27. Дорофеев В.С., Выровой В.Н., Шеховцов И.В., Макарова С.С. Влияние технологической поврежденности на характер разрушения железобетонных плит//Материалы XXIII Международной конференции в области бетона и железобетона. - М.:Стройиздат, 1991. - С.56-57.

28. Дорофеев В.С., Майборода В.Ф., Марченко Т.С. Технологическая коррекция подвижности бетонной смеси, обеспечивающая мак-

симальное сцепление нового бетона со старым//Материалы XIV Всесоюзного семинара актива ВНТО строительной индустрии "Передовая технология строительного производства". - М., 1991. - С. 110-112.

29. Дорофеев В.С., Кара Дамур А.Х. Учет технологической поврежденности бетона при малоцикловых воздействиях//Повышение долговечности и эффективности работы конструкций сельскохозяйственных зданий и сооружений: Материалы международной научно-технической конференции. - Челябинск, 1992. - С. 72-73.

30. Диордиенко Л.Д., Дорофеев В.С., Майстренко Ф.М. Форма для изготовления трубчатых изделий из бетонных смесей. - А.с. № 654423 от 07.12.78 г.

31. Барданов Д.М., Дорофеев В.С. Учебный прибор по сопротивлению материалов и теории упругости. - А.с. № 1772117 СССР МКИ 093 23/06, 30.10.92. - Бюл. № 40.

32. Барданов Д.М., Дорофеев В.С., Барданов В.Ю. Учебный прибор по сопротивлению материалов и строительной механике. - Полож.реш. № 4408067/12(011621).

33. Выровой В.Н., Дорофеев В.С., Макарова С.С., Абакумов С.А. Способ выявления трещин в бетонных и железобетонных конструкциях на неорганическом вяжущем.-Полож.реш.№5008907/33 (059304) от 03.07.91.

34. Залесов А.С., Дорофеев В.С., Шеховцов И.В. Прочность и деформативность плит на продавливание//Бетон и железобетон. - 1992. - № 8. - С. 14-17.

Підп. до друку 12.11.93р. Формат 60x84 1/16
Обсяг 2,25 друк, арх. Тир. 130пр. Зам. 1617.
Одеська фабрика "Олімпія".

464728

AB 28968

AB 28.968