

М.Г. Стащук, С.Й. Солодкий*

Національний університет "Львівська політехніка",
кафедра обчислювальної математики,

*кафедра автомобільних шляхів

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАЛІТИЧНА ОЦІНКА ПОВНОТИ ПОВНІСТЮ РІВНОВАЖНИХ ДІАГРАМ ДЕФОРМУВАННЯ БЕТОНІВ

© Стащук М.Г., Солодкий С.Й., 2007

Експериментально встановлено, що характерні точки повністю рівноважної діаграми деформування бетонів з наперед створеною тріщиною при згині залежать від рецептурно-технологічних чинників. Запропоновано функцію для опису діаграми в координатах "навантаження-переміщення". Інтегрування функції дасть змогу оцінити повноту діаграми.

The article considers the analytical-experimental approach to estimating concrete fracture energy. There have been fully analyzed the equilibrium diagrams of composites deformation of the concrete type, obtained with the help of fracture mechanics methods. Functional dependencies "loading – displacement" for concretes with a different aggregate content have been proposed.

Вступ. Завдання механіки руйнування бетону полягає у формулюванні найзагальніших критеріїв опору бетону поширенню тріщин протягом усього терміну експлуатації матеріалу. Для розв'язання цього завдання необхідно здійснити перехід від міцнісної до кінетичної концепції руйнування, в основу якої покладено інваріантні константи бетону – в'язкість руйнування та енергію руйнування. Енергетичні критерії, зокрема загальна енергія руйнування, дають змогу оцінити опір бетону розвитку тріщин до критичного рівня, а також порівняти ефективність застосування різних видів бетону в конкретних умовах експлуатації.

Постановка проблеми. Подальше вдосконалення методів розрахунку бетонних і залізобетонних конструкцій вимагає використання моделей, що ґрунтуються на реальних діаграмах деформування матеріалів з урахуванням характеру і тривалості дії навантаження [1]. Сьогодні робляться спроби теоретично апроксимувати криву повністю рівноважної діаграми деформування (ПРДД) бетону з метою переведення розрахунку бетонних і залізобетонних елементів з емпіричної в теоретичну площину. Залучення для цього такої інваріантної характеристики, як енергія руйнування, є найбільш перспективним шляхом. У зв'язку з енергетичною зарядженістю повної діаграми деформування бетону використання такої характеристики дасть можливість виготовити бетонні елементи з певним енергетичним потенціалом перерізів, що відповідає умовам експлуатації цієї конкретної конструкції.

Аналіз останніх досліджень. Порівняно детально розроблені аналітичні вирази для діаграм деформування бетонів і арматури для одноосного стиску (розтягу) в [2–4]. В межах деформаційної теорії залізобетону стверджується, що повна рівноважна діаграма „ $\sigma_b - \epsilon_b$ ” бетону є енергетичною характеристикою матеріалу, а її параметри у рамках прийнятих допущень – його константами [5]. Автор пропонує в розрахунковому перерізі бетонного елемента зв'язок між напруженнями та деформаціями стиснутого бетону приймати у вигляді такої діаграми. Досліджено вплив напружено-

деформованого стану пружних тіл, а також їх границь на взаємодію між собою тріщиноподібних дефектів, що є важливим для застосування критеріїв і методів лінійної механіки руйнування до бетонів [6]. В нових будівельних нормах Російської Федерації за основу розрахунку бетонних і залізобетонних елементів під дією згинальних моментів і поздовжніх сил за усіма граничними станами прийнято деформаційну модель, яка використовує умову деформування у вигляді гіпотези плоских перерізів, і повні діаграми стану бетону і арматури [7]. Така модель уможливує здійснювати розрахунок за єдиною методологією будь-яких бетонних і залізобетонних елементів з різною конфігурацією поперечного перерізу і розташуванням поздовжньої арматури.

Мета роботи – оцінити повністю рівноважні діаграми деформування бетонів при згині з наперед створеною тріщиною в координатах „навантаження-переміщення”, яку пропонується назвати повнотою діаграми.

Матеріали і методи досліджень. Аналіз повністю рівноважних діаграм деформування (ПРДД) здійснювали на різних модельних системах, а саме: цементній матриці (ЦМ), цементній матриці з дрібним заповнювачем (піщаний бетон, цементогрунт), цементній матриці з дрібним і великим заповнювачами (важкий крупнозернистий бетон).

Як в'язуче використовували два види композиційних цементів (V тип за класифікацією ДСТУ Б В.2.7-46-96), модифікованих сульфатом натрію (5 % мас.): КЦ-1 – “портландцементний клінкер – доменний гранульований шлак – перліт”, КЦ-2 – “портландцементний клінкер – доменний гранульований шлак – зола-виносу ТЕС”, а також бездобавочний портландцемент (I тип), який отримували помолом клінкеру, що використовувався для приготування композиційних цементів з додатком двоводного гіпсу (5 % мас.). Як дрібний заповнювач використовували кварцовий пісок з модулем крупності $M_{кр.}=1,3$, як крупний заповнювач – гранітний щебінь фракції 5–20 мм.

ПРДД отримували шляхом випробування бетонних зразків з наперед створеною тріщиною за схемою триточкового згину. Дослідження реалізовані на пристрої, виготовленому на кафедрі автомобільних шляхів НУ “Львівська політехніка”, за методикою рівноважних випробувань [8]. Важливою перевагою концепції рівноважних випробувань є те, що розраховані за ПРДД енергетичні та силові характеристики руйнування бетону інваріантні до умов випробувань.

Результати досліджень та їх обговорення. Отримані внаслідок випробувань ПРДД для матеріалів на різних цементах показано на рис. 1, 3, 5, а розраховані силові та енергетичні характеристики тріщиностійкості – на рис. 2, 4, 6.

Як бачимо з рис. 1, 3, 5, площа діаграм деформування, а отже, і робота, що витрачається на деформування і руйнування матеріалів незалежно від складу цементу, зростає в такій послідовності: цементогрунт, цементна матриця, піщаний бетон, крупнозернистий важкий бетон. Це підтверджується і значеннями силових та енергетичних характеристик тріщиностійкості матеріалів (рис. 2, 4, 6). Найвищі значення силових та енергетичних характеристик тріщиностійкості притаманні крупнозернистим важким бетонам. Це дає підстави для твердження, що наповнення ЦМ дрібним і крупним заповнювачами сприяє підвищенню тріщиностійкості матеріалу, зокрема, за рахунок збільшення довжини шляху макротріщини.

Закономірності деформування матеріалів із різним видом і вмістом заповнювачів на цементах різних типів є однаковими, проте спостерігаються істотні відмінності у діаграмах деформування залежно від типу цементу, виду і кількості заповнювачів, а саме:

- кут нахилу висхідної вітки діаграми до осі абсцис не є постійним і залежить від складу цементу, виду і кількості заповнювачів;
- значення критичного навантаження і переміщення, за яких відбувається злам діаграми, відрізняються для однакових матеріалів на різних цементах;
- повнота діаграм у закритичній стадії залежить від речовинного складу цементу;

– переміщення, за яких відбувається дефрагментація зразків для різних матеріалів на цементі одного типу, відрізняється у 2–3 рази;

Виявлені відмінності кореспондуються зі значеннями енергетичних і силових характеристик тріщиностійкості матеріалів (рис. 2, 4, 6).

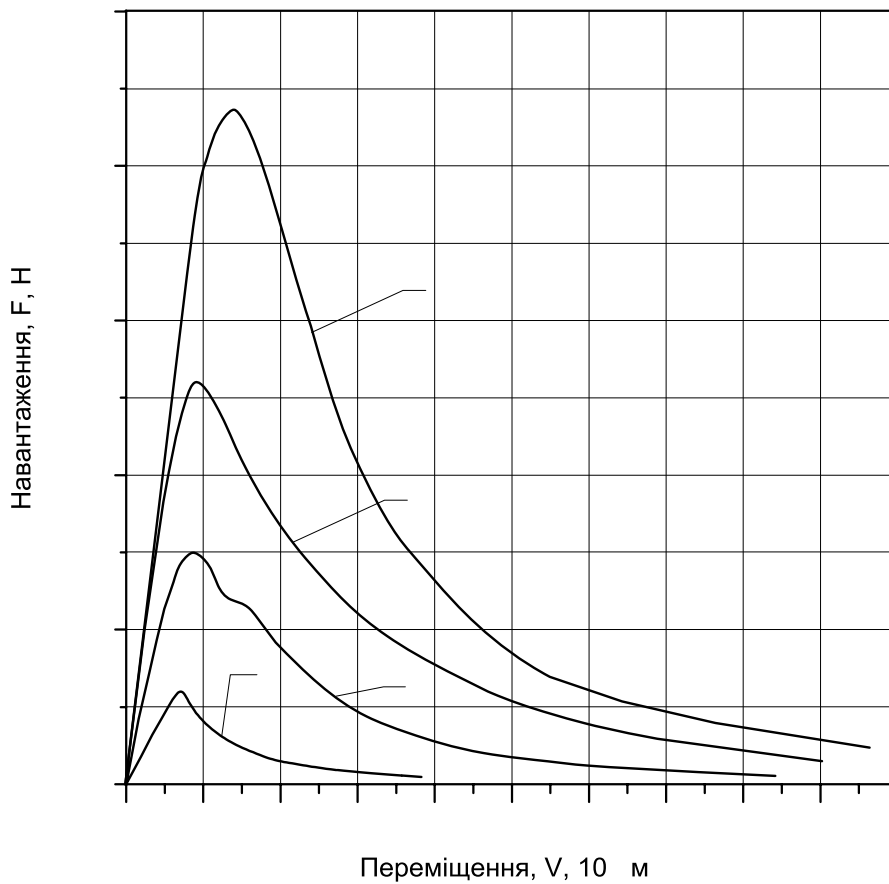


Рис. 1. ПРДД матеріалів на КЦ-1: 1 – цементна матриця; 2 – цементогрунт; 3 – піщаний бетон; 4 – крупнозернистий бетон

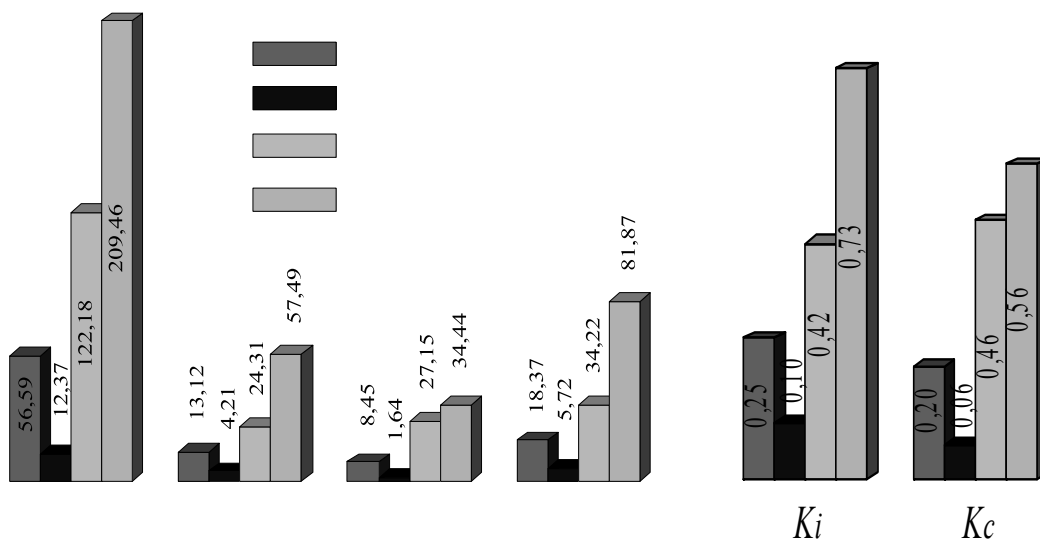


Рис. 2. Діаграми значень характеристик тріщиностійкості для матеріалів на КЦ-1

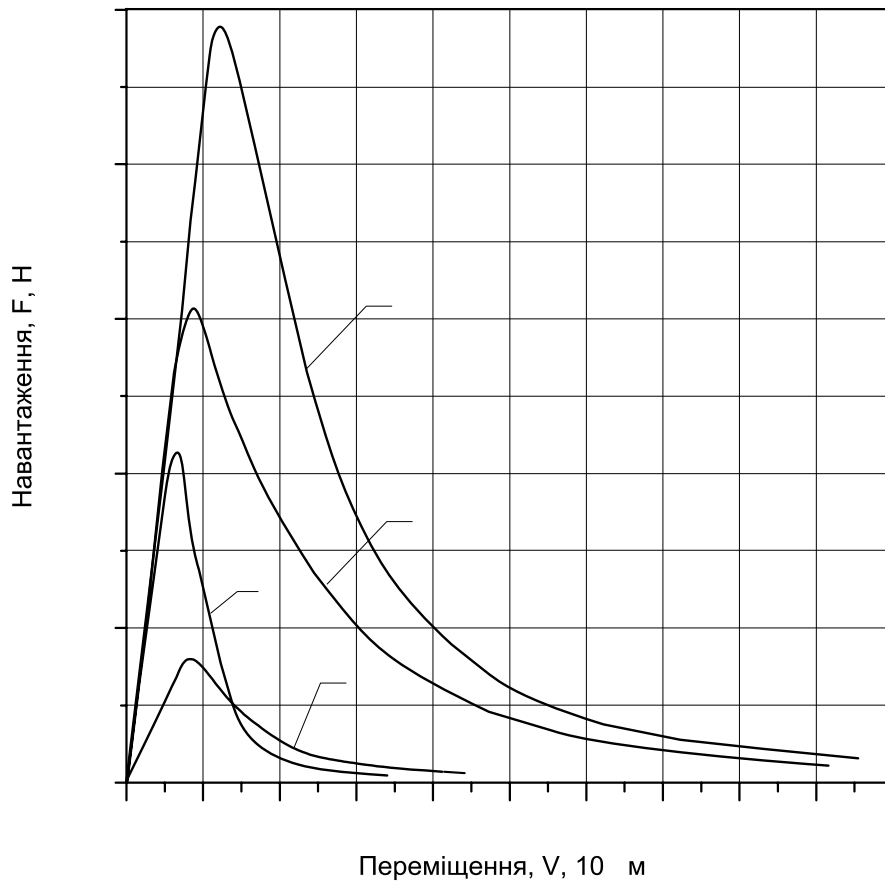


Рис. 3. ПРДД матеріалів на КЦ-2: 1 – цементна матриця; 2 – цементогрунт; 3 – піщаний бетон; 4 – крупнозернистий бетон

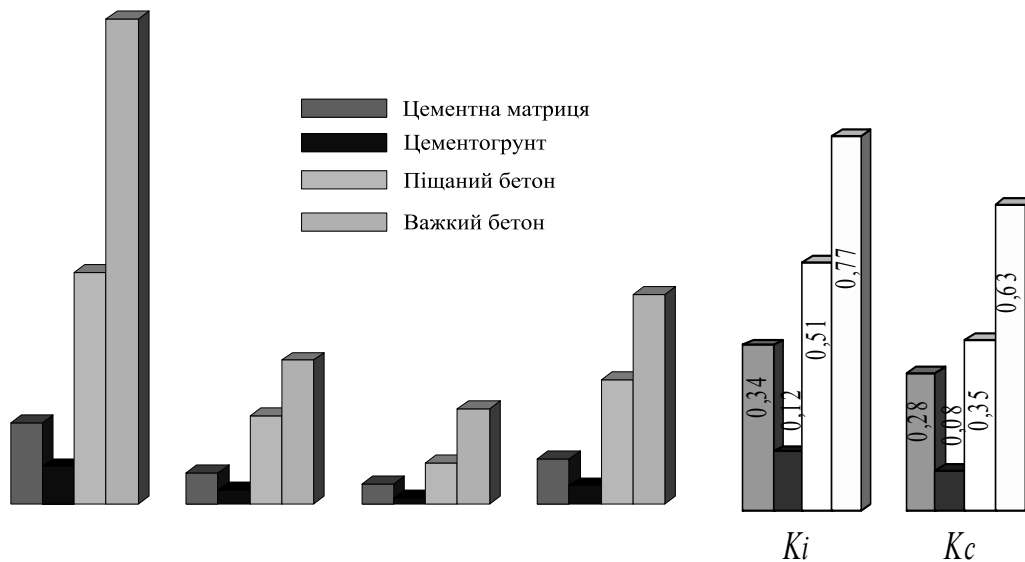


Рис. 4. Діаграми значень характеристик тріщиностійкості для матеріалів на КЦ-2

Конфігурація кривої діаграм деформування матеріалів із різним вмістом заповнювачів на різних цементах є однотипною, що дає можливість описати залежність „навантаження-переміщення” для усіх матеріалів функцією одного виразу. Характеристиками діаграми можна вважати (рис. 7): кут нахилу висхідної вітки діаграми до осі абсцис (α), кут нахилу спадаючої вітки

до осі абсцис (β), точки – закінчення прямолінійної ділянки висхідної вітки (1), зламу (2), перегину спадаючої вітки діаграми (3), дефрагментації (4).

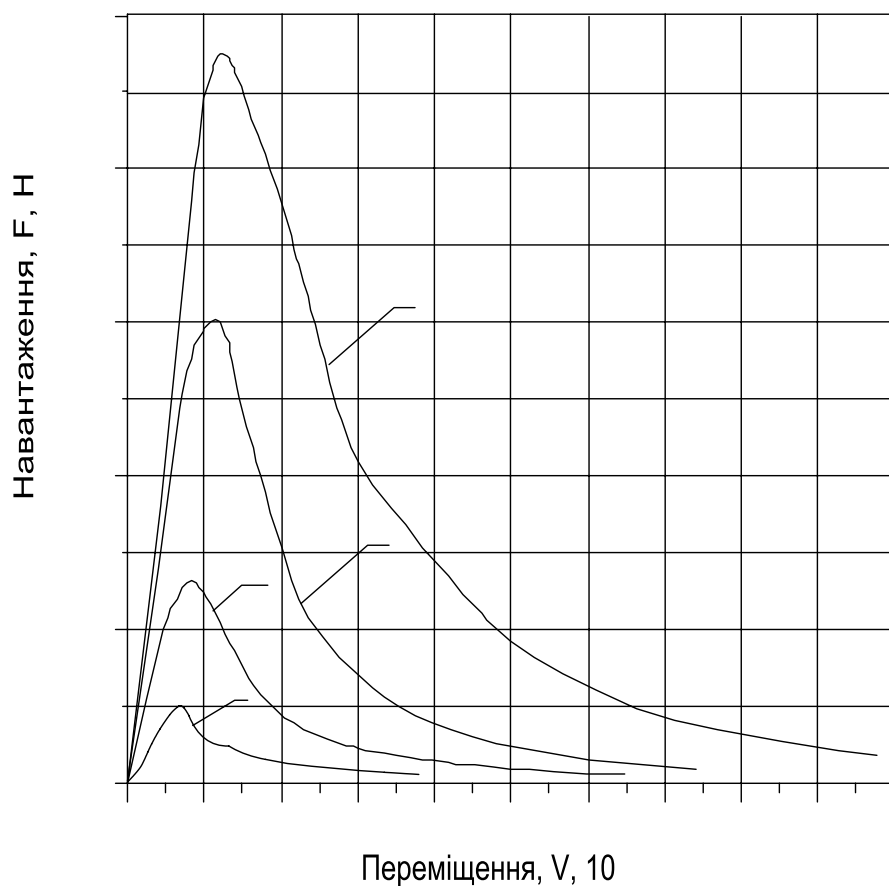


Рис. 5. ПРДД матеріалів на ПЦ: 1 – цементна матриця; 2 – цементогрунт; 3 – піщаний бетон; 4 – крупнозернистий бетон

Аналіз відомих у [5] діаграм деформування бетонів дає змогу зробити висновок про можливість опису ПРДД функцією такого виразу:

$$F(v) = AV^B e^{CV}. \quad (1)$$

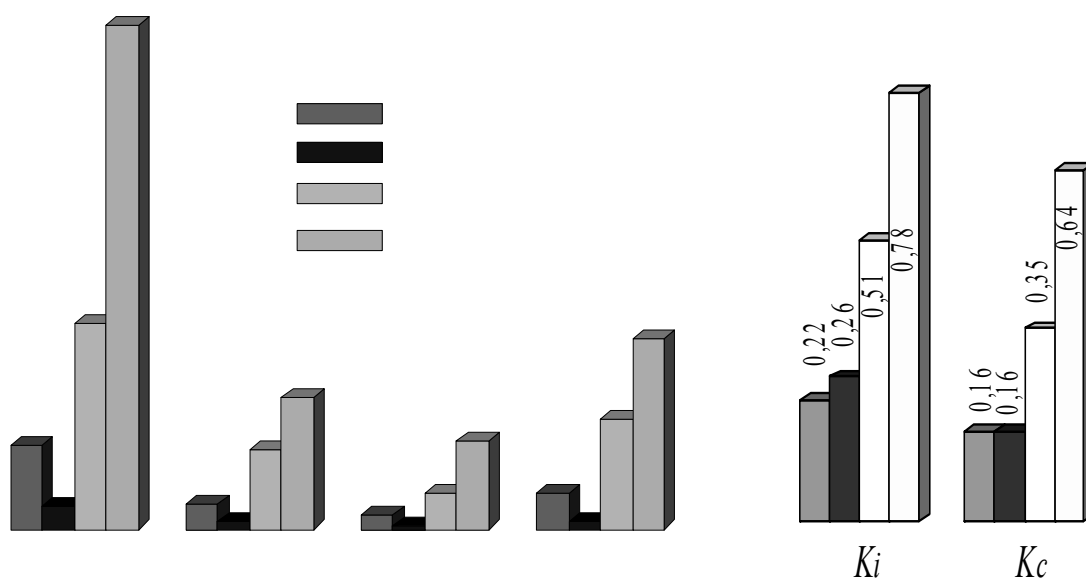


Рис. 6. Діаграми значень характеристик тріщиностійкості для матеріалів на ПЦ

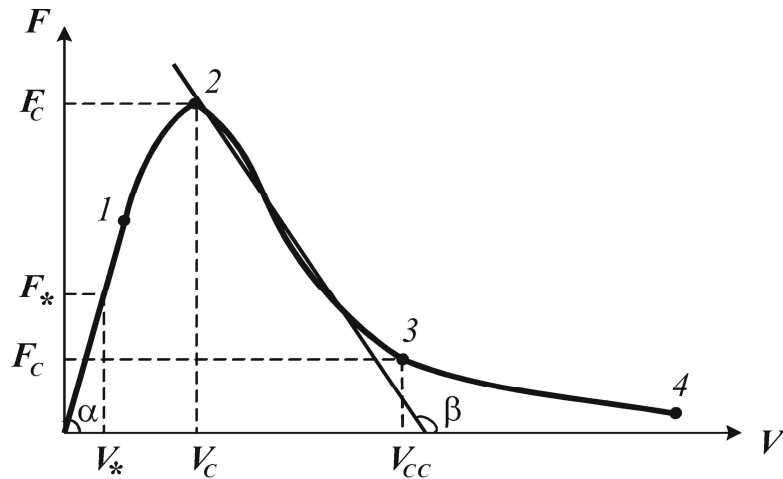


Рис. 7. Параметричні точки ПРДД

Параметри A, B, C , які фігурують у цій залежності, знаходимо, враховуючи фізичні і геометричні міркування, а також реальні експериментальні дані для відповідних характеристик тріщиностійкості бетону. Вважатимемо, що відрізок зміни величини V від точки $V = 0$ до точки V_c , в якій функція $F(V)$ набуває максимального значення, відповідає майже лінійному закону зміни зусилля F від переміщення V . З огляду на це, приймемо, що параметр A є відомим. Він у першому наближенні дорівнюватиме значенню похідної від функції $F(V)$ за параметром V в деякій точці $V_* \in [0, V_c]$ проміжку прямолінійної зміни зусиль F . Отже

$$A = \left. \frac{dF}{dV} \right|_{V=V_*}, \quad (2)$$

тобто параметр A дорівнюватиме тангенсу кута нахилу висхідної вітки діаграми в області пружних деформацій бетону до осі OV системи координат FOV . Обчислимо похідну

$$\frac{dF}{dV} = AV^{B-1}e^{CV}(B+CV) = AV^B e^{CV} \frac{(B+CV)}{V} = F(V) \frac{(B+CV)}{V}. \quad (3)$$

Похідна $\frac{dF}{dV} = 0$ за $V_c = -\frac{B}{C}$. Тоді $F_c = F(V_c) = A \left(-\frac{B}{C}\right)^B \cdot e^{-B}$ або $F_c = A \left(-\frac{V_c}{e}\right)^B$.

Звідки

$$A = F_c \left(\frac{e}{V_c}\right)^B. \quad (4)$$

Визначимо тепер параметр B . Розглянемо другу похідну

$$\frac{d^2F}{d^2V} = \frac{F(V)}{V^2} [(B+CV)^2 - B]. \quad (5)$$

Знаходимо, що точка перегину діаграми руйнування бетону

$$V_c = \left(1 + \frac{1}{\sqrt{B}}\right) V_c. \quad (6)$$

Як бачимо, точка V_{cc} знаходиться справа від точки V_c , що підтверджує вірогідність такого підходу до оцінювання ПРДД, тобто ця точка відповідає області руйнування матеріалу. Точку V_{cc} можна прийняти за момент вичерпання ресурсу бетону. Важливим фактом є те, що ця точка визначається через початковий параметр ПРДД бетону у пружній зоні його деформування, що може використовувати визначення для ефективної поверхневої енергії в бетонах.

З формули (6) визначаємо параметр

$$B = \frac{1}{\left(\frac{V_{cc}}{V_c} - 1\right)^2}. \quad (7)$$

Отже, діаграма руйнування бетонного зразка може бути описана функцією (1).

Висновки: 1. Конфігурація кривої, повністю рівноважної діаграми деформування бетонів із різним видом і вмістом заповнювачів на різних цементах, є однотипною, що дає можливість описати діаграму в координатах „навантаження-переміщення” функцією одного виразу.

2. Характеристиками діаграми можна вважати: кути нахилу висхідної і спадаючої віток до осі абсцис, точки – закінчення прямолінійної ділянки висхідної вітки, зламу, перегину спадаючої вітки, дефрагментації.

3. Запропоновано функцію, що описує ПРДД бетону. Інтегрування функції дає можливість оцінити загальну роботу, що витрачається на деформування і руйнування бетону.

4. Теоретико-експериментальний аналіз діаграм руйнування бетонів показує, що точка перегину кривої руйнування бетону з позицій механіки руйнування може бути остаточною критичною точкою на діаграмі, координати якої відповідають руйнуванню бетону. За критерій руйнування в такому разі можна приймати таку точку, з досягненням якої бетонний зразок можна вважати таким, що вичерпав свою несучу здатність.

1. Яременко А.Ф., Яременко Е.А. О применении диаграмм деформирования материалов к расчету строительных конструкций // Бетон и железобетон в Украине. – 2004. – №2. – С. 8–12. 2. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. – М.: Стройиздат.– 1996.– 416 с. 3. Карпенко Н., Мухамедиев Т.А., Петров А.Н. Исходные и трансформированные диаграммы деформирования бетона и арматуры // Напряженно-деформированное состояние бетонных и железобетонных конструкций. – М.: НИИЖБ. – 1986. – С. 7–25. 4. Яременко Е.А. Диаграммы деформирования бетона и каменной кладки // Бетон и железобетон в Украине. – №1. – 2001. – С. 10–13. 5. Бамбура А.М. Експериментальні основи прикладної деформаційної теорії залізобетону: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.01. – Харків: Харківськ. ДТУАБ, 2006. – 39 с. 6. Стацук Н.Г. Задачи механики упругих тел с трещиноподобными дефектами. – К.: Наукова думка, 1993. – 360 с. 7. Звездов А.И., Залесов А.С., Мухамедиев Т.А., Чистяков Е.А. О новых нормах проектирования железобетонных и бетонных конструкций // Бетон и железобетон. – 2002. – №2. – С. 2–6. 8. ГОСТ 29167-91. Бетоны. Методы определения характеристик трещиностойкости при статическом нагружении.