

УДК 620.179.16

П.М. Сташук

Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра БКМ

**ВИВЧЕННЯ КІНЕТИКИ ПРОЦЕСІВ ТРІЩИНОУТВОРЕННЯ  
МЕТОДОМ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ \***

© Сташук П.М., 2002

**Описана програма проведених комплексних випробувань та методика дослідження процесів тріщиноутворення залізобетонних балок за методом акустичної емісії. Наведені експериментальні дані процесів тріщиноутворення, визначені методом АЕ.**

Визначення технічного стану бетонних і залізобетонних конструкцій вимагає отримання інформації про процеси тріщиноутворення в матеріалах залежно від напружено-деформованого стану елементів. Найефективнішим методом дослідження процесів тріщиноутворення є метод акустичної емісії (АЕ), який дозволяє виявити утворення мікротріщин і фіксувати приріст тріщин навіть на десяти частки міліметра [1], що вказує на його високу чутливість. Практичне використання методу АЕ для технічної діагностики бетонних і залізобетонних конструкцій неможливе без ґрунтовних експериментальних досліджень для виявлення чіткого зв'язку між акустико-емісійним випромінюванням, напружено-деформованим станом та тріщиноутворенням в бетоні.

У Національному університеті “Львівська політехніка” виконана програма комплексних випробувань п'яти серій бетонних та залізобетонних зразків, виготовлених із важкого бетону різного складу та міцності. У програму досліджень входило випробування бетонних кубів розміром 100×100×100 на осьовий стиск, бетонних кубів розміром 100×100×100 на розколювання, бетонних призм розміром 150×150×600 на осьовий стиск, бетонних призм розміром 150×150×600 на згин за схемою чистого згину, бетонних призм розміром 100×100×400 на згин зосередженою силою, бетонних дисків діаметром 500 мм на позакентровий розтяг, арматурних стрижнів робочої арматури залізобетонних балок на розтяг, випробування залізобетонних балок на згин. Характеристики досліджуваних бетонів і програма експериментальних досліджень представлена в роботі [2].

Кінетику процесів тріщиноутворення в згинаних залізобетонних балках вивчали при випробуванні п'яти серій балок розміром 100×200×2100 мм (рис. 1). Кожна серія балок відрізнялася міцністю бетону на стиск: I-33 МПа, II-35 МПа, III-49 МПа, VI-55 МПа, V-67 МПа.

Конструкція дослідних балок і схема армування показана на рис. 1. Каркас залізобетонних балок складався з робочої арматури 1Ø 12 мм класу А-III довжиною 2080 мм.

В крайніх третях прогону було забезпечено поперечне армування арматурою Ø 3 мм класу Вр-1 довжиною 180мм. Крок поперечних стрижнів становив 100 мм, загальна кількість стрижнів поперечної арматури 19 шт. Верхнє армування виконане з стрижнями Ø 3 мм класу Вр-1 довжиною 730 мм в крайніх третях прогону. Процент армування поперечного перерізу конструкції становить 0,642 %. Основні характеристики сталі робочої арматури наведено в таблиці.

---

\*Робота виконана під керівництвом канд. техн. наук, доц. П.М. Коваля.

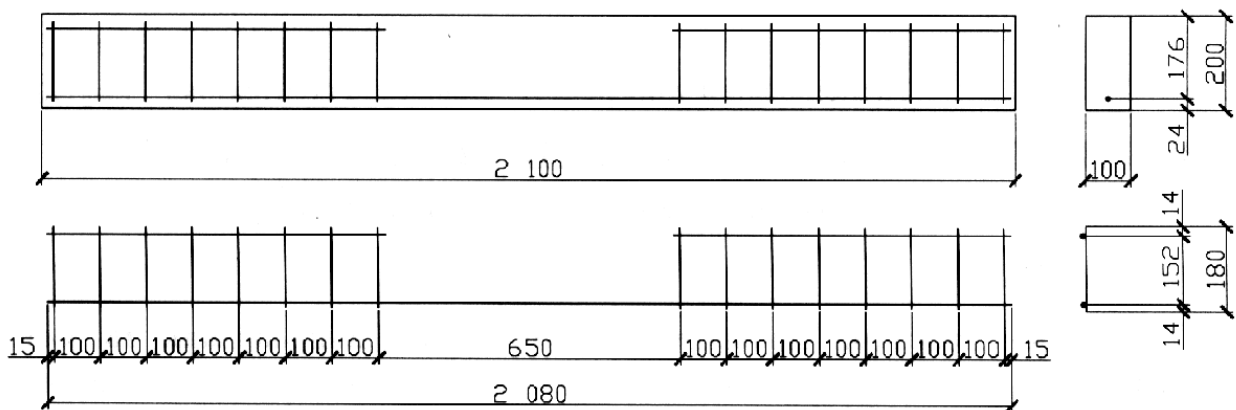


Рис. 1. Конструкція залізобетонної балки

### Характеристики сталі робочої арматури

Діаметр арматури, мм	Марка сталі	$A_s$ , $\text{см}^2$	$E_s \cdot 10^{-4}$ , МПа	$\sigma_B$ , $\text{кН/см}^2$	$\sigma_T$ , $\text{кН/см}^2$	Відносне видовження $\delta$ , %
12	35ПС	1,313	20,6	62,1	43,6	24,24

Випробувувались залізобетонні балки у віці 460–500 діб за схемою чистого згину (рис. 2). Випробування здійснювали на силовому стенді (рис. 3) двома зосередженими силами, розташованими в третях прогону. Завантажувальним пристроєм служив десятитонний гідравлічний домкрат у комплекті з насосною станцією. Навантаження прикладали ступенями за схемою: перші три ступеня по 30 %  $M_{cr}$ , наступні три – 10 %  $M_{cr}$ , решта по 20 %  $M_{cr}$ . Витримка навантаження на кожному ступені була мінімум 15 хв, після чого знімали відліки з приладів. Загальний час тривалості ступеня становив 50 хв. Рівень навантаження контролювався протарованим кільцевим динамометром встановленим над розподільчою траверсою, та показами манометра насосної станції. Відліки за індикатором динамометра знімали відразу після досягнення необхідного рівня навантаження та їх контролювали упродовж всього ступеня.

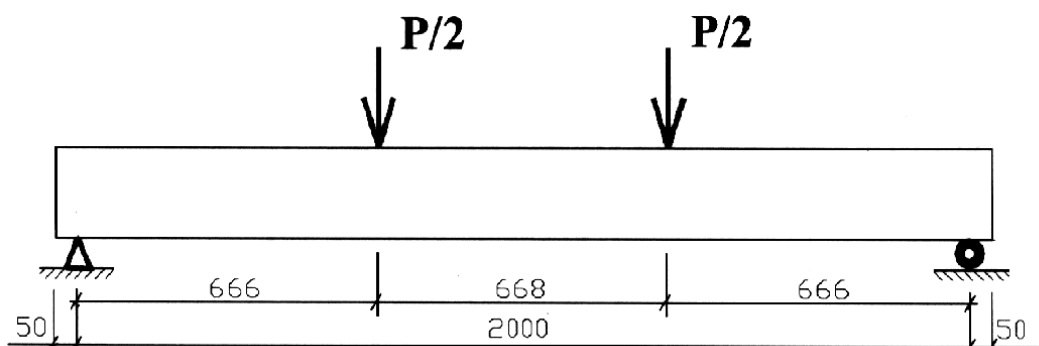


Рис. 2. Схема випробування залізобетонних балок

При випробуванні проводили визначення прогинів балки під навантаженням, для чого на ній встановлювали рамку для кріплення індикаторів годинникового типу з ціною поділки 0,01 мм (рис. 3). Прогин фіксували два рази: до і після зняття відліків на ступені.

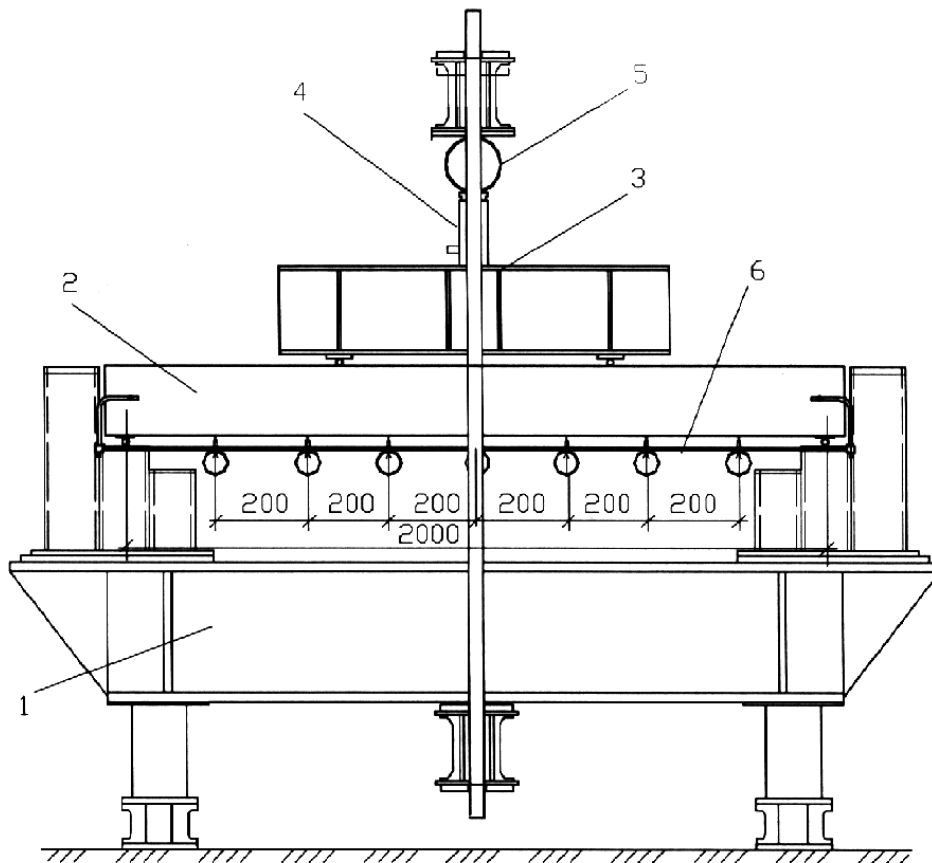


Рис. 3. Схема випробування залізобетонної балки на силовому стенді:  
 1 – стенд; 2 – балка; 3 – розподільча траверса; 4 – домкрат;  
 5 – динамометр; 6 – рамка з індикаторами

Фібри деформації бетону балки заміряли, використовуючи тензорезистори з базою 50 мм у комплекті з вимірювальним приладом ЦТК-1, та механічний компаратор. Тензорезистори та репери для компаратора приклеювали клеєм циакрін. Наклеювали за 1–2 доби перед експериментом. Схема розміщення тензорезисторів та реперів компаратора показана на рис. 4. Деформації арматури балки вимірювали в зоні чистого згину посередині прогону тензорезисторами базою 20 мм розміщеними ланцюжком по середині прогону (рис. 5), з використанням вимірювального пристрою ЦТК-1. На арматурі попередньо зачищали ребро, на яке приклеювали давачі за допомогою клею циакрін, і заливали їх шаром епоксидної смоли товщиною 3 мм, з додаванням заповнювача у вигляді талька. Деформації фіксували після 15-ти хвилинної витримки після завантаження балки.

Вимірювали час проходження ультразвуку через масив балки поверхневим прозвучуванням ультразвуковим компаратором з комплекту УК-14 П за схемою, аналогічною вимірюванню деформацій бетону балки механічним компаратором, а також визначали характеристики ультразвукової хвилі при проходженні через стиснену зону конструкції приладом УК-10П (схема розміщення давачів на рис. 4). Давачі через шар солідолу встановлювались на боковій поверхні балки в межах стисненої зони бетону на віддалі 500 мм один від одного по середині прогону, та притискались до неї гумовою стрічкою. Дані фіксували після 15 хвилинної витримки після завантаження балки.

При випробуванні балок досліджували сигнали АЕ, що виникали в конструкції за допомогою програмно-технічного комплексу АКЕМ, що дозволяє проводити обробку

параметрів сигналів АЕ за 20 параметрами. Давач АЕ через шар акусто-прозорого мастила “Рамзай” встановлювали на нижній грані балки та притискали до неї гумовою стрічкою (рис. 4), Сигнали, що реєструвалися, підсилювались і надходили на ЕОМ для обробки і подальшого аналізу з використанням пакета програм “АКЕМ”. Програмно-технічний комплекс побудований на базі персонального комп'ютера з використанням технології “PCLabCard”. Підсилення сигналу АЕ здійснювалось попереднім підсилювачем з чутливістю на вході 10 мкВ, частотним діапазоном 100–2000 кГц, коефіцієнтом підсилення 90 дБ і з динамічним діапазоном 40–65 дБ. Запис акустичної емісії проводили у два етапи: під час завантаження та витримки на кожному ступені.

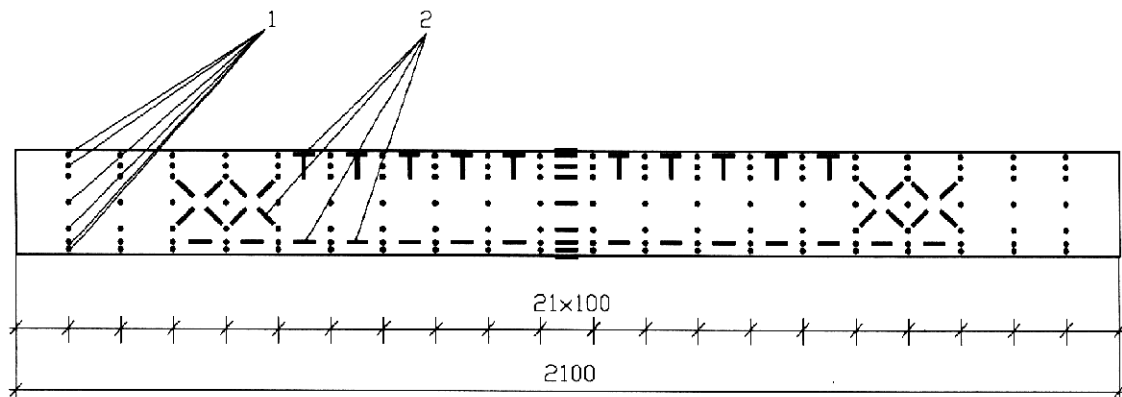


Рис. 4. Схема розміщення тензорезисторів та реперів для вимірювання деформацій бетону залізобетонної балки:  
1 – репери; 2 – тензорезистори з базою 50 мм

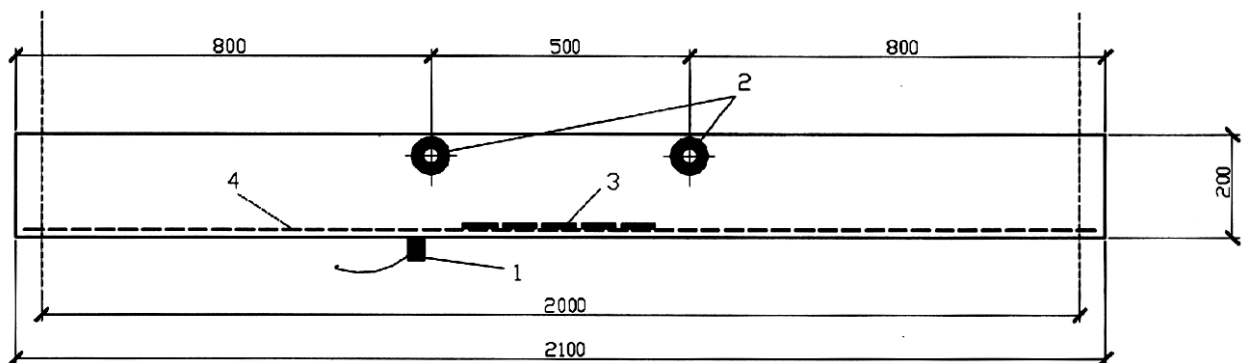


Рис. 5. Схема розміщення датчика акустичної емісії (1), ультразвукових датчиків (2), та тензорезисторів з базою 20 мм (3) на робочій арматурі (4)

Ширину розкриття тріщин визначали за допомогою мікроскопа МПБ-2, що дозволяє збільшення зображення у 24 рази, та ціною поділки 0,05 мм. Вимірювання проводили на кожному ступені завантаження з моменту появи тріщин, до навантаження, що дорівнює 0,7–0,8 від руйнівного. Проводилась фіксація ширини розкриття “старих” тріщин, їх розвитку та положення, а також поява “нових” тріщин на кожному ступені навантаження.

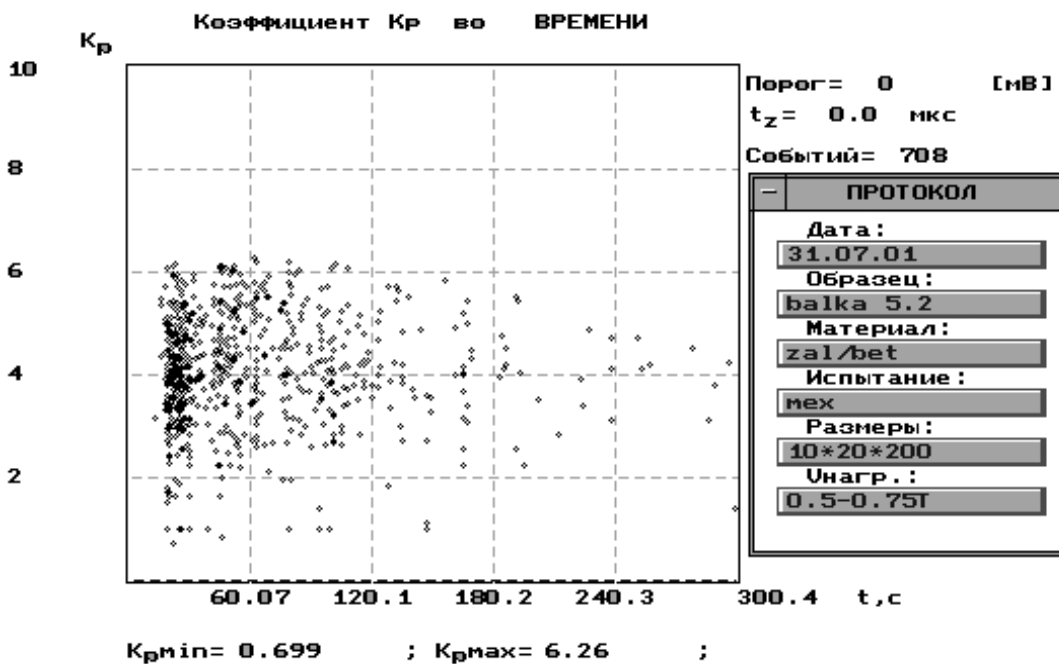
Аналіз акустичної емісії на ступенях завантаження дозволяє ідентифікувати сигнали від тріщин за індивідуальними енергетичними характеристиками, а проведення сумісного аналізу інформації по ступенях завантаження – здійснювати оцінку небезпеки їх розвитку.

В праці [1] використано підхід, що базується на основних положеннях кінетичної теорії руйнування твердих тіл. Згідно з [3] процеси руйнування зводяться до поступового накопичення дефектів структури матеріалу внаслідок кожного порціального впливу навантаження. У випадку довільної послідовності напружень  $\sigma_i$ , кожному з яких відповідає довговічність  $\tau(\sigma_i)$ , при часі дії кожного напруження  $\Delta t_i$ , руйнування настане, коли сума відносних значень довговічності (ресурсу роботи конструкції) почне дорівнювати одиниці. Для випадку, коли напруження на окремих інтервалах часу залишається постійним і змінюється тільки при переході від одного інтервалу до другого, руйнування настане за умови

$$\sum_{i=1}^n \frac{\Delta t_i}{\tau(\sigma_i)} = 1. \quad (1)$$

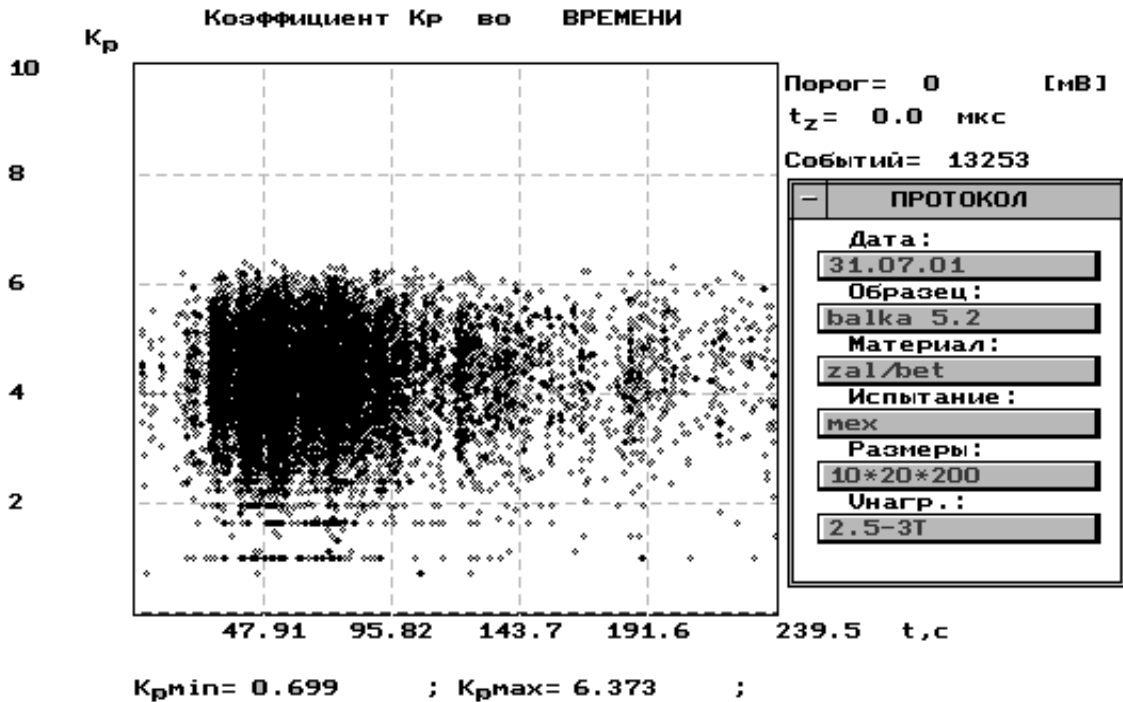
Ця умова характеризує принцип накладання порціальних руйнувань, тобто руйнування підсумовують до граничного стану, коли настає руйнування. Це повною мірою відноситься до акустичної емісії, котра є відображенням процесів, що відбуваються в матеріалах на мікро – та макро- рівнях та готують їх до руйнування.

Результати експериментальних досліджень бетонних та залізобетонних конструкцій показують, що при їх завантаженні реєструються сигнали АЕ. При зростанні напружень з'являються тріщини, що різко відбивається на характері випромінювання. Із наближенням до руйнування АЕ набуває вигляду лавиноподібного процесу (рис. 6), що підтверджує факт розвитку дефектів структури з поступовим накопиченням руйнувань, котрі призводять до руйнування. Ступінь розвитку небезпеки їх розвитку, згідно з [1], визначає роботоздатність та довговічність конструкції при прийнятих умовах випробування чи експлуатації.



а

Рис. 6. Характер акустичної емісії при випробуванні залізобетонної балки серії V:  
а – зміна навантаження на ступені з 7,5 до 10 кН



б

Рис. 6. Характер акустичної емісії при випробуванні залізобетонної балки серії V:  
б – зміна навантаження на ступені з 25 до 30 кН

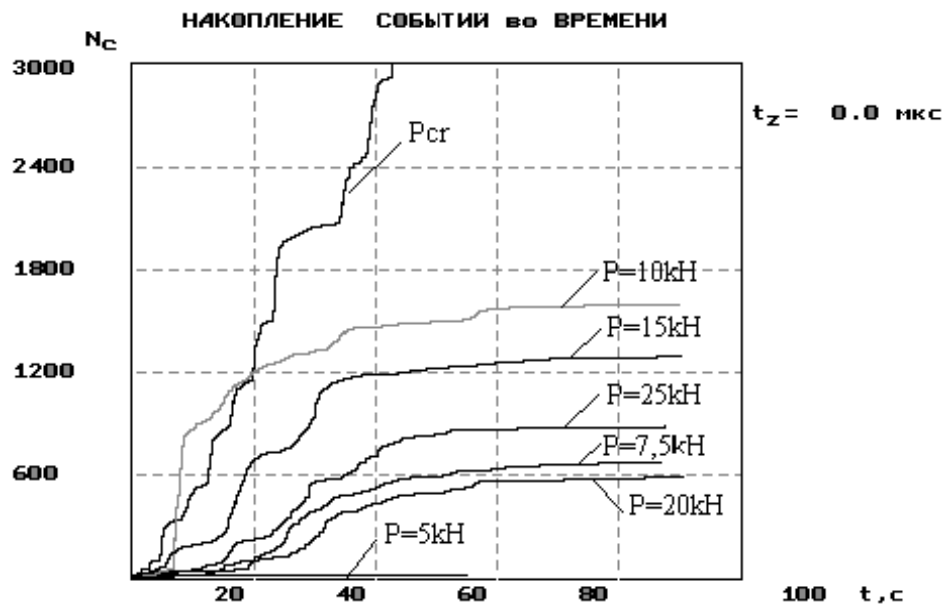


Рис. 7. Кінетика накопичення кількості сигналів АЕ  
на ступенях навантаження на прикладі залізобетонної балки із серії II

### Висновки

Проведені дослідження показали, що метод акустичної емісії дає змогу зафіксувати процеси мікро- та макротріщиноутворення на всіх стадіях роботи залізобетонних конструкцій і ці результати узгоджуються з принциповими положеннями теорії міцності бетону.

Кінетика накопичення сигналів акустичної емісії відповідає процесам утворення і розвитку тріщин в залізобетонних балках та несе в собі інформацію про стан конструкції в цілому. Проведені комплексні дослідження бетонних і залізобетонних зразків дозволяють знайти зв'язок між сигналами акустичної емісії, напружено-деформованим станом та процесами тріщиноутворення в бетоні.

1. Філоненко С.Ф. *Акустическая эмиссия. Измерение, контроль, диагностика.* – К., 1999. – 312 с. 2. Коваль П.М., Сташук П.М. *Перспективи технічної діагностики мостів з використанням методу акустичної емісії // Будівельні конструкції.* – 2001. – Вип. 54. – С. 310–316. 3. Маламедов И.М. *Физические основы надежности.* – Л., 1970. – 152 с.

**УДК 614.841.3**

**Т.М. Шналь, В.І. Хоржевський, Ю.Е. Павлюк, Р.В. Пархоменко**  
Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра БКМ

## **ТЕХНІЧНА ДІАГНОСТИКА ТА ПОДАЛЬША ЕКСПЛУАТАЦІЯ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ ПІСЛЯ ПОЖЕЖІ**

© Шналь Т.М., Хоржевський В.І., Павлюк Ю.Е., Пархоменко Р.В., 2002

**У статті розглянуті питання технічної діагностики та подальшої експлуатації залізобетонних конструкцій після пожежі. Описано критерії оцінки стану залізобетонних конструкцій та методи їх визначення. Розглянуті способи відновлення пошкоджених конструкцій.**

Після пожежі в будівлях і спорудах виникає задача з оцінки фактичного стану будівельних конструкцій, розв'язувати яку можна за параметрами, що характеризують їх придатність до подальшої нормальної експлуатації [1, 2]. З цією метою можна використовувати систему технічної діагностики, що включає засоби визначення стану залізобетонних конструкцій будівель після пожежі без їх демонтажу й випробування руйнуючим навантаженням. Це дозволяє об'єктивно оцінити стан будівлі в цілому після пожежі, її конструкцій і порівняти визначені параметри з їх нормативними значеннями (рис. 1, 2).

Руйнівний вплив пожежі на будівлю характеризується такими параметрами:

- вогневим навантаженням на будівельні конструкції;
- тривалістю теплового впливу;
- максимальною температурою пожежі;
- температурою прогрівання конструкції за перерізом.