

УДК 693.5

*Троян В.В., кандидат технічних наук, докторант,  
Київський Національний університет будівництва і  
архітектури,  
м. Київ*

## ПРОГНОЗУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТРІЩИНОУТВОРЕННЯ БЕТОНІВ ДЛЯ МОНОЛІТНИХ КОНСТРУКЦІЙ

### Вступ

Підвищення тріщиностійкості (мінімізація тріщиноутворення) бетонів є ключовою складовою забезпечення несучої здатності та корозійної стійкості монолітних залізобетонних конструкцій [1, 2].

Тверднення бетону монолітних залізобетонних конструкцій практично завжди супроводжується утворенням та розкриттям тріщин:

- короткостроковим розкриттям тріщин - внаслідок недотримання належного температурно-вологісного режиму тверднення бетону;
- довгостроковим розкриттям тріщин - внаслідок нерівномірних по перетину деформацій під дією температури навколишнього середовища і усадки бетону.

При цьому, наявність і параметри розкриття тріщин оцінюють з урахуванням можливих причин утворення тріщин та їх впливу на несучу здатність елемента конструкції і корозійну стійкість залізобетону (арматури).

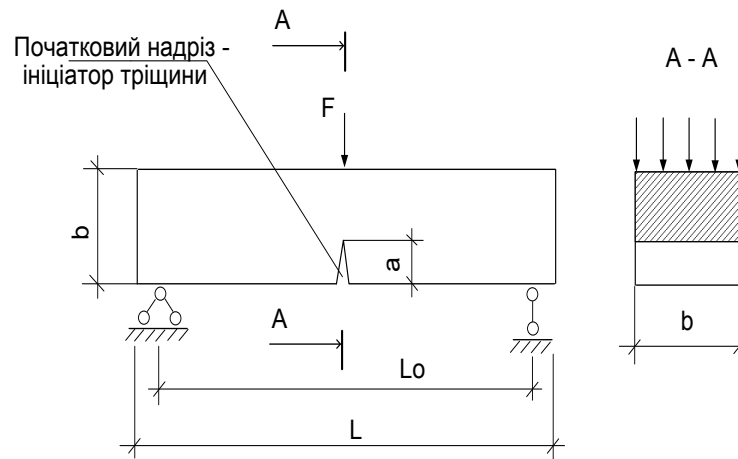
Одним з ефективних шляхів прогнозування параметрів тріщиноутворення бетону монолітної конструкції є використання положень теорії механіки руйнувань та методу кінцевих елементів (МКЕ) [3]. Так, шляхом оптимізації одержаної за МКЕ моделі конструкції, можна винайти характеристики тріщиноутворення, за яких напруження в системі будуть мінімальними, або такими, що не призводять до подальшого розвитку тріщин. При цьому умови початку росту тріщини можна сформулювати як досягнення напруженнями критичного значення, використовуючи в якості критерію крихкого руйнування критичний коефіцієнт інтенсивності напружень (КІН) у вершині тріщини.

Отже, **метою** даної роботи було прогнозування параметрів тріщиноутворення бетону монолітних конструкцій за допомогою методу кінцевих елементів.

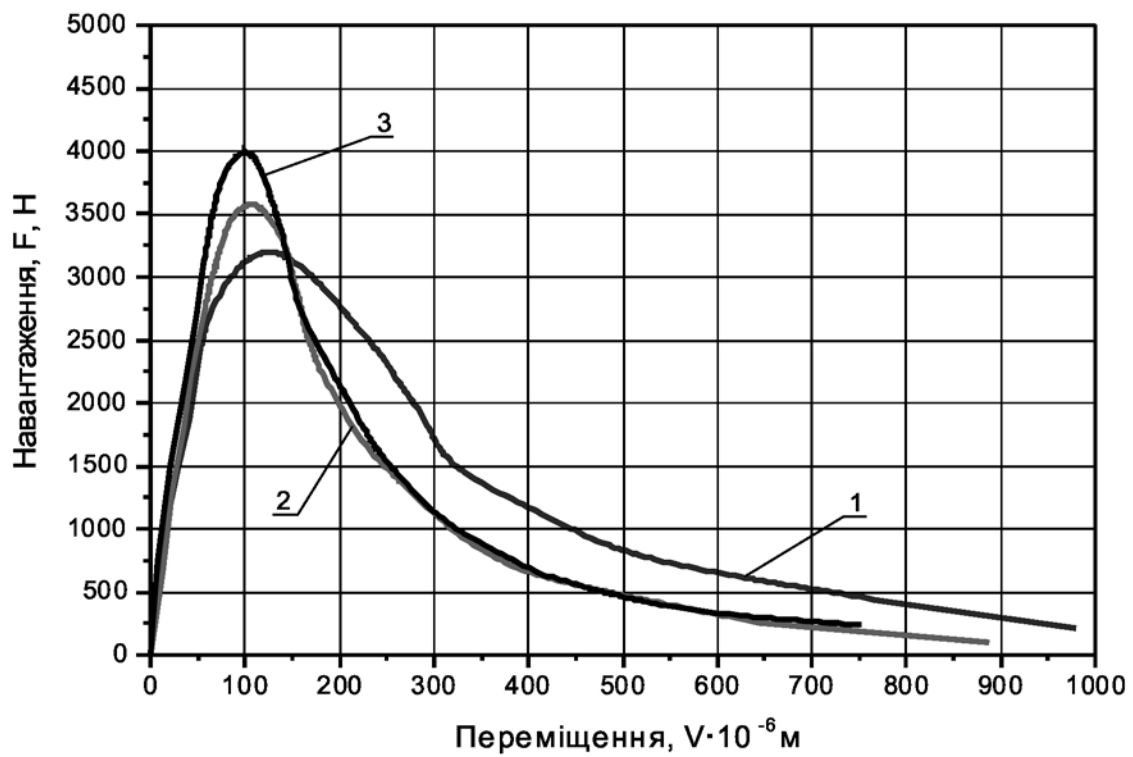
Для цього були одержані моделі тріщиностійкості трьох складів крупнозернистих бетонів за даними рівноважних механічних випробувань (рис.1, 2, табл.1), проведених на кафедрі автомобільних шляхів Національного університету "Львівська політехніка" [4].

Повністю рівноважні діаграми деформування важких бетонів мали вигляд, наведений на рис. 2, а розрахункові силові характеристики тріщиностійкості – у табл. 1.

За моделями були розраховані значення КІН (табл. 1), що відповідають початку тріщиноутворення (кінець лінійної ділянки на рівноважній діаграмі рис.2), як опис полів напружень у вершині тріщини (рис.3) у вигляді сингулярності  $1/\sqrt{r}$  (де  $r$  – відстань від вершини тріщини до точки, напруження в якій розглядаються).



**Рисунок 1 - Схема випробувань зразка-призми на згин з ініційованою тріщиною**  
 ( $a=0,04$  – довжина початкового надрізу шириною  $0,002$ , м;  $b=0,1$ ;  $L=0,4$ ;  
 $L_0=0,38$  – розміри зразка, м;  $F$  – навантаження на зразок, кН)



**Рисунок 2 - Повністю рівноважні діаграми деформування важких крупнозернистих бетонів на основі: 1 – КЦ-1; 2 – КЦ-2; 3 – ПЦ**

Таблиця 1 - Фізико-механічні характеристики важких бетонів

| Умов. познач. цементу | Серія бетону | Середня густина, кг/м <sup>3</sup> | Границя міцності, 28 діб, МПа |         | Модуль пружності, 28 діб, E <sub>b</sub> x10 <sup>3</sup> , МПа |           | КІН                                   |  |
|-----------------------|--------------|------------------------------------|-------------------------------|---------|---|-----------|---------------------------------------|--|
|                       |              |                                    | на стиск                      | на згин | при стиску  | при згині | K <sub>c</sub> , МПа·м <sup>1/2</sup> | K <sub>модель</sub> , МПа·м <sup>1/2</sup> |
| КЦ-1                  | Б-1          | 2370                               | 39,5                          | 7,6     | 33,8  | 22,2      | 0,66                                  | <b>0,67</b>                                |
| КЦ-2                  | Б-2          | 2360                               | 46,3                          | 8,0     | 38,8  | 26,4      | 0,67                                  | <b>0,68</b>                                |
| ПЦ                    | Б-3          | 2375                               | 53,5                          | 7,7     | 41,1  | 30,1      | 0,70                                  | <b>0,72</b>                                |

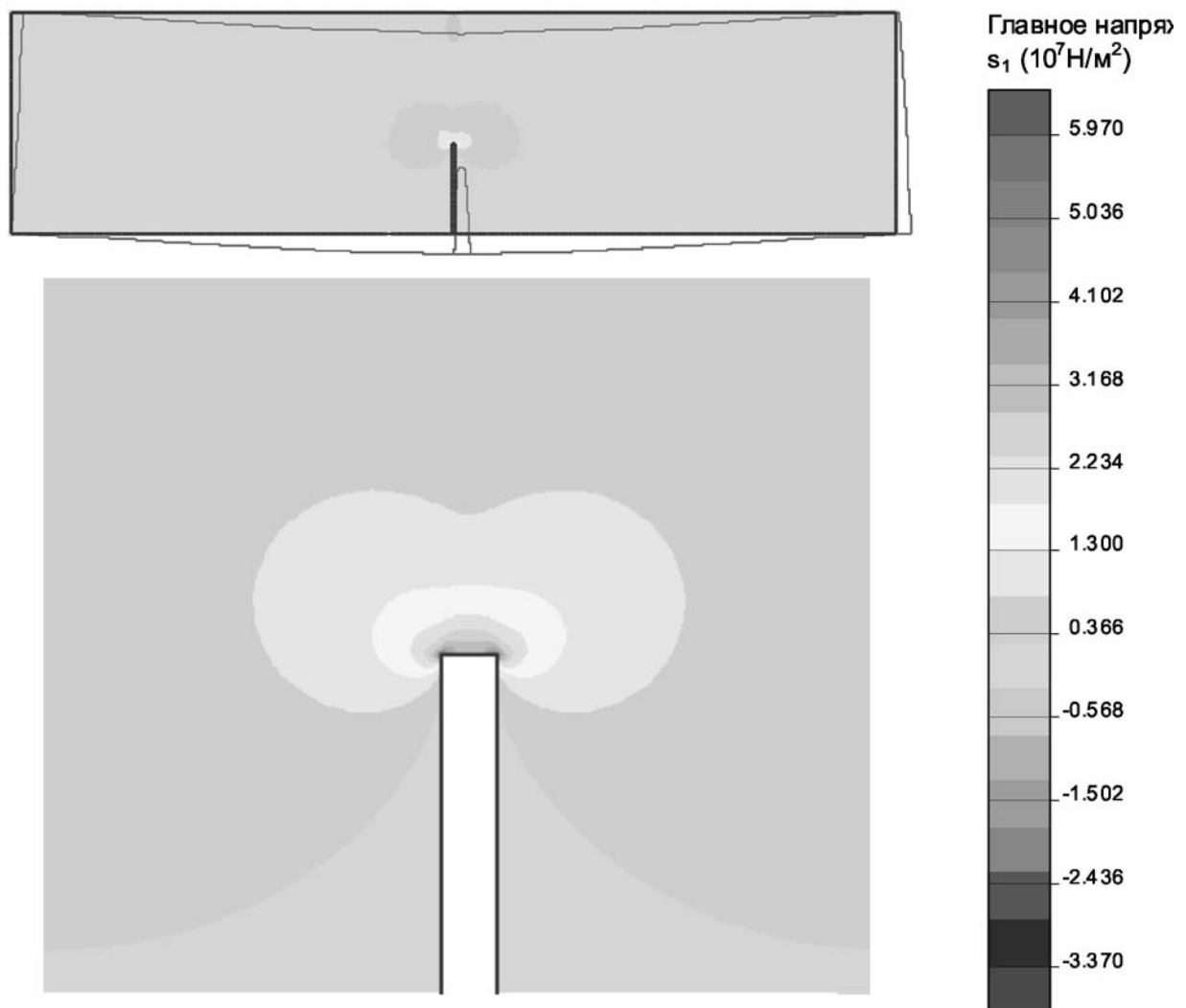


Рисунок 3 - Модель випробування на згин зразка-призми з ініційованою тріщиною

Як видно з табл.1, одержані за моделями значення КІН фактично відповідають значенням розрахованим за результатами рівноважних механічних випробувань.

Отже, запропонована методологія дозволяє повноцінно використовувати МКЕ для прогнозування параметрів тріщиноутворення різних складів бетонів, з відомими КІН. При цьому оскільки точність моделювання пов'язана з розмірністю сітки, дискретність сітки в області тріщини повинна бути достатньою для адекватної оцінки КІН.

За моделлю розподілу температур по перетину куба (рис. 4), були розраховані поля напружень в поверхневому шарі бетону в залежності від глибини тріщин, крок яких приймався у відповідності з кроком армування (рис.5).

Як видно з рис.5, внаслідок розвитку тріщиноутворення напруження в поверхневому шарі бетону знижується з одночасною концентрацією напружень у вершині тріщин.

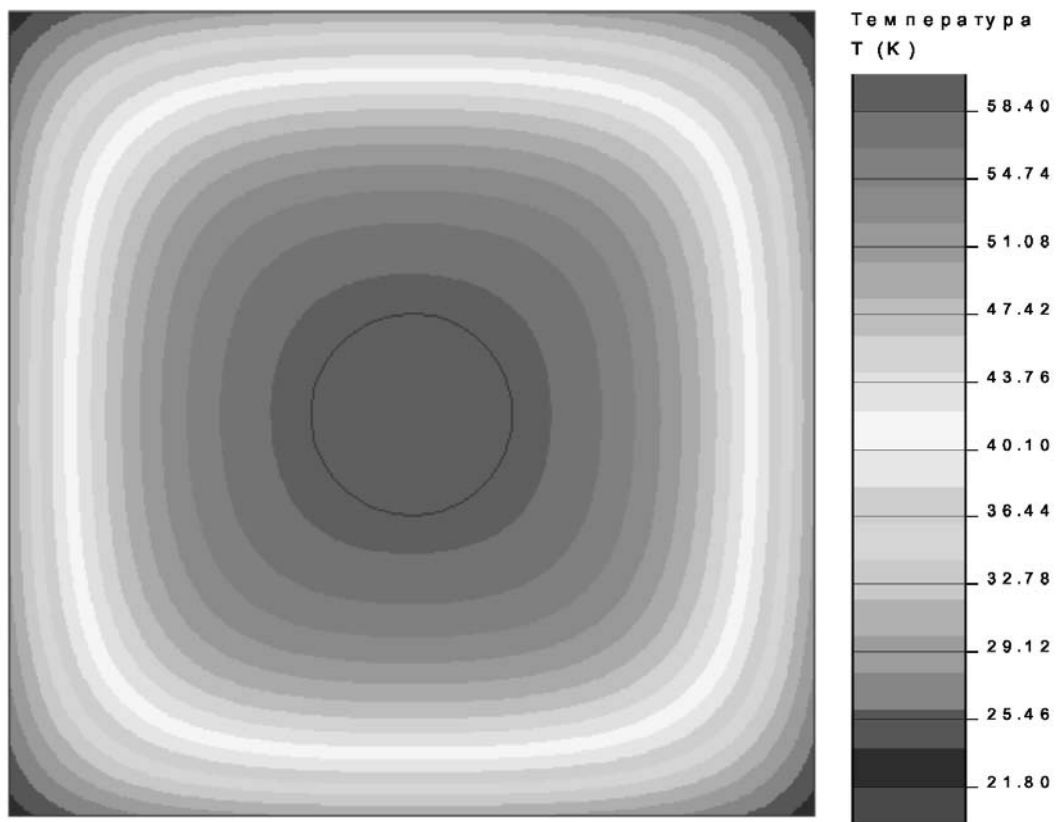


Рисунок 4 - Розподіл температур по перетину куба на 2 добу тверднення

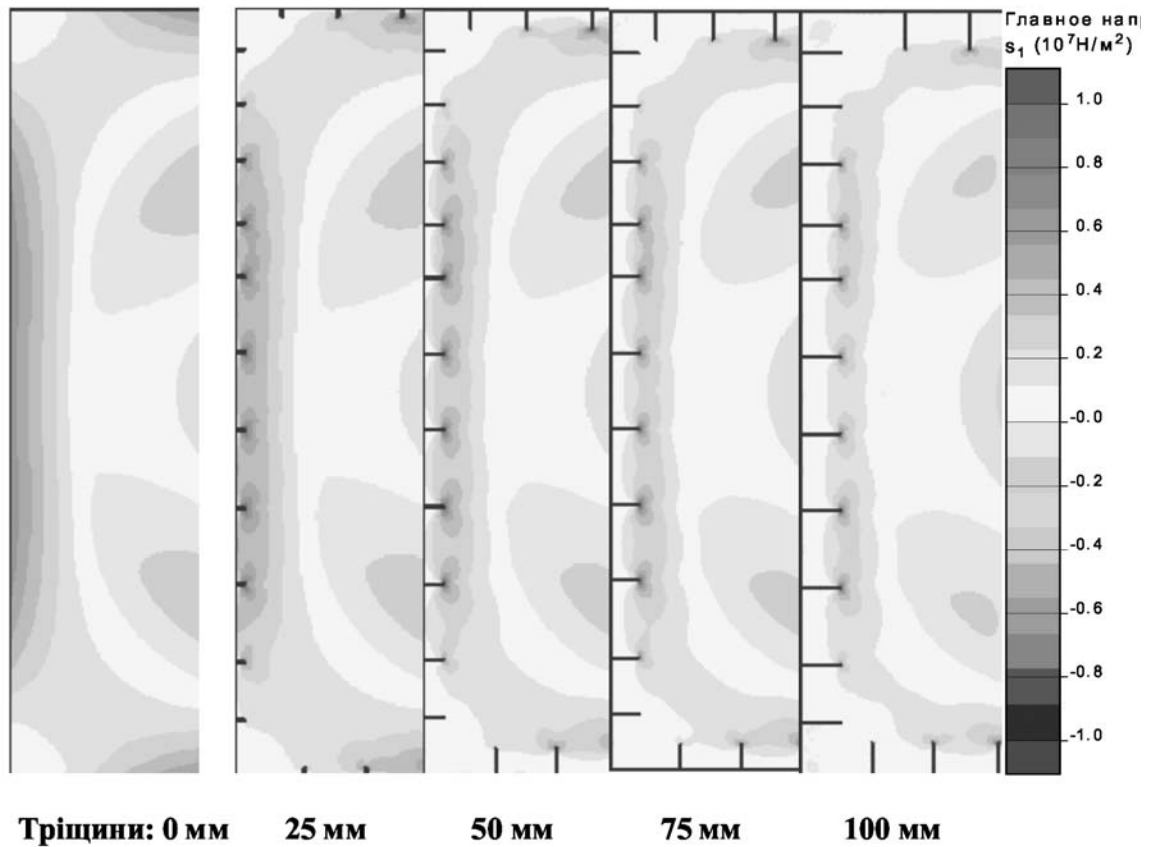


Рисунок 5 - Напруження в поверхневому шарі бетону в залежності від глибини тріщин

За результатами аналізу напружень в поверхневому шарі бетону (рис.6), спостерігається їх закономірне зниження при збільшенні глибини тріщин до рівня міцності бетону на розтяг.

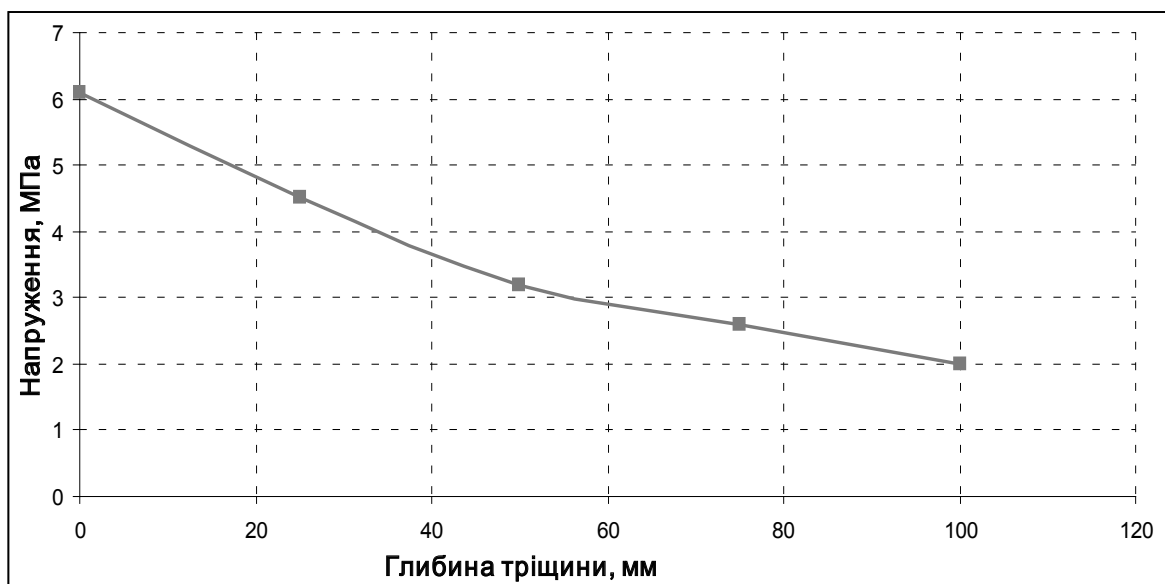


Рисунок 6 - Напруження в поверхневому шарі бетону в залежності від глибини тріщин

При цьому, за умови глибини тріщин понад 70мм (рис.7), значення КІН у вершині тріщин не перевищують критичного для бетону на портландцементі (табл.1).

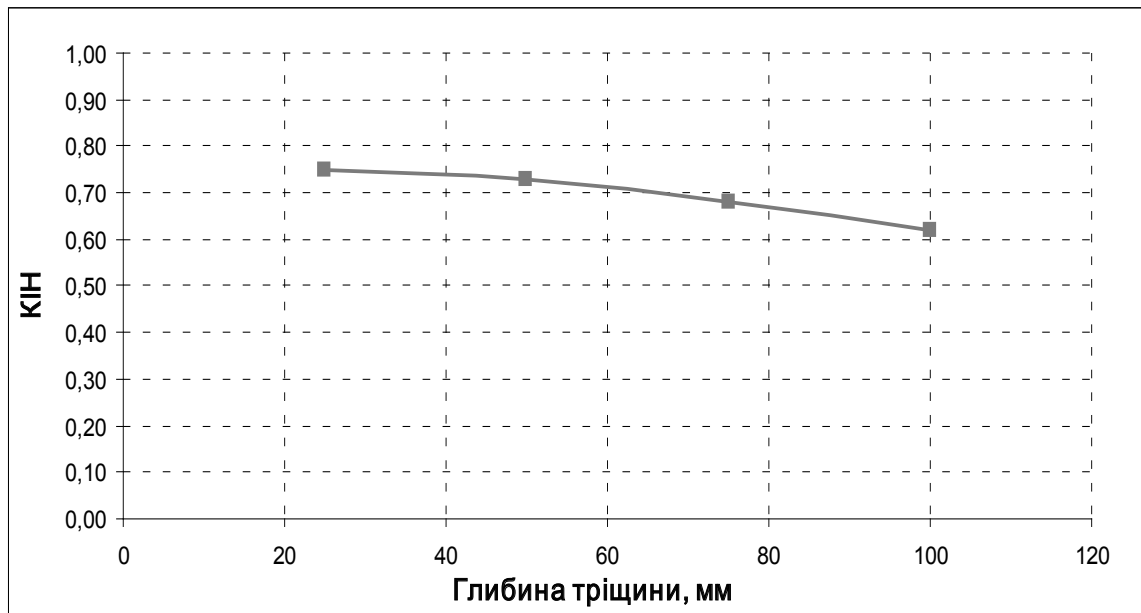


Рисунок 7 - Значення КІН у вершині тріщин в залежності від їх глибини

Аналіз ширини розкриття тріщин (рис.8) свідчить про їх стабілізацію на рівні  $\sim 0,033$ мм при глибині понад 75 мм.

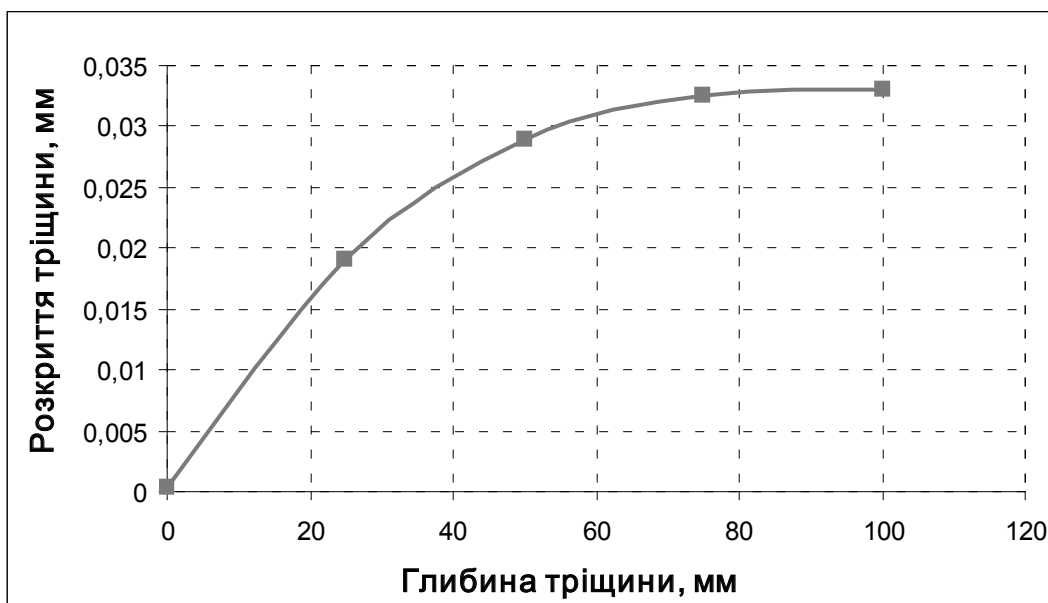


Рисунок 8 - Ширина розкриття тріщин в залежності від їх глибини

Слід відзначити, що при моделюванні термонапруженого стану також доцільно враховувати випаровування води з поверхні затверділого бетону, що призводить до прискорення усадочних деформацій та збільшення температурних градієнтів. При цьому, вплив усадочних деформацій на параметри тріщиноутворення бетону також може бути оцінений за допомогою теорії механіки руйнувань та МКЕ.

### **Висновки**

Таким чином, проблема прогнозування тріщиноутворення залізобетону внаслідок власного термонапруженого стану та усадочних деформацій, може бути ефективно вирішена з використанням положень теорії механіки руйнувань і методу кінцевих елементів, при врахуванні процесів тепло- і масопереносу та їх впливу на механічні властивості масивного залізобетону.

### **ЛІТЕРАТУРА**

1. Й.Штарк, Б.Вихт. Долговечность бетона. / Пер. с нем. – А. Тулаганова. Под ред.. П. Кривенко. Киев., «Оранта», 2004, 293 с.
2. Алексеев С.Н., Иванов Ф.М., Модры С., Шисль П. / Долговечность железобетона в агрессивных средах: Совм. изд. СССР - ЧССР - ФРГ - М.: Стройиздат, 1990. - 320 с.
3. Пухонто, Л.М. Долговечность железобетонных конструкций инженерных сооружений : монография / Л.М. Пухонто. – М. : АСВ, 2004. – 425 с.
4. Солодкий С. Й. Наукові засади підвищення тріщиностійкості дорожнього цементного бетону : Дис на здоб. наук. ступеня д-ра наук: 05.23.05 - 2009.