

УДК 624.072.2.012.35

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ КРИТИЧНОГО
КОЕФІЦІЕНТУ ІНТЕНСИВНОСТІ НАПРУЖЕНЬ БЕТОНІВ
СЕРЕДНЬОЇ ТА ПІДВИЩЕНОЇ МІЦНОСТІ**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКОГО КОЭФ-
ФИЦИЕНТА ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ БЕТОНОВ СРЕД-
НЕЙ И ПОВЫШЕННОЙ ПРОЧНОСТИ**

**EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE CRITICAL STRESSES
INTENSITY FACTOR FOR CONCRETES OF AVERAGE AND IN-
CREASED STRENGTH**

В.П. Митрофанов, к.т.н., (Керівник Центру Передових Методів Розрахунку Залізобетонних Конструкцій, Полтава, Україна) **Н.М. Пінчук, к.т.н., ст. викладач, П.Б. Митрофанов, к.т.н., ст. викладач, С.П. Івашенко, магістрант, Н.А. Безнігаєв, студент** (Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Україна)

В.П. Митрофанов, к.т.н., (Руководитель Центра Передовых Методов Расчёта Железобетонных Конструкций, Полтава, Украина) **Н.М. Пинчук, к.т.н., ст. преподаватель, П.Б. Митрофанов, к.т.н., ст. преподаватель, С.П. Иващенко, магистрант, Н.А. Безнигаев, студент** (Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка, Украина)

V.P. Mitrofanov, PhD, (Head of the Centre for Advanced Design Methods of Concrete Structures, Poltava, Ukraine) **N.M. Pinchuk, PhD, senior lecturer, P.B. Mitrofanov, PhD, senior lecturer, S.P. Ivaschenko, master student, N.A. Bez-nigaev, student** (Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University, Ukraine)

Викладається методика і результати експериментів з визначення критичного коефіцієнту інтенсивності напружень звичайних бетонів з кубковою міцністю 20–50 МПа.

Излагается методика и результаты экспериментов по определению критического коэффициента интенсивности напряжений обычных бетонов с кубиковой прочностью 20–50 МПа.

It is stated the technique and results of experiments on determination of the critical stress intensity factor for usual concretes with cubic strength 20–50 MPa.

Ключові слова:

бетон, тріщина, критичний коефіцієнт інтенсивності напружень, балковий зразок з затяжкою.

бетон, трещина, критический коэффициент интенсивности напряжений, балочный образец с затяжкой.

concrete, crack, critical stress intensity factor, beam specimen with tie.

Введение. Применение механики хрупкого разрушения (МХР) открывает новые возможности существенного уточнения расчётов и повышения качества железобетонных конструкций, в которых на основе МХР можно более надёжно исключить трещины или управлять их развитием, если они допустимы. Но использование МХР требует знания дополнительного параметра бетона, характеризующего сопротивление его распространению трещины. В МХР известно несколько таких характеристик, способных по-разному учитывать влияние необратимых деформаций у тупикового конца трещины. Этим параметрам отвечает различная сложность их экспериментального определения и расчётов проектируемых конструкций. Но с точки зрения практической простоты и с учётом полученных к настоящему времени экспериментальных данных [1–12] и других о применимости МХР к бетону, обычно предпочитают «критический коэффициент интенсивности напряжений (КИН) K_{IC} » и соответствующий критерий распространения трещины. Однако параметр K_{IC} (как и другие) ещё недостаточно изучен для бетона и опытные исследования его величины необходимы.

Постановка проблемы. Для определения параметра K_{IC} бетона разработаны зарубежные [13, 14], украинский [15], российский [16] и другие стандарты, рекомендующие использовать широкий спектр бетонных образцов с искусственными разрезами, выполняемыми тем или иным способом. Очевидно, искусственный разрез не является тождественным в своей тупиковой области естественной трещине. Но этот недостаток искусственного разреза фактически исчезает в процессе нагружения бетонных образцов: как показывают опыты за тупиковым концом разреза всегда развивается его продолжение (подростание) в виде сначала устойчивой естественной трещины. Подростание разреза оказывается достаточно значительным и расчёт величины K_{IC} только по длине разреза без учёта приращения за счёт подростания трещины приводит к существенному занижению значения K_{IC} . Всё же в некоторых экспериментах, например [10], не учитывается подростание разреза, а в стандартах [15, 16] на этот факт тоже не обращается внимание. Напротив, в [12] подчёркивается, что K_{IC} вычислялся по длине трещины как суммы глубины искусственного разреза и «физического подростания трещины (physical

crack growth)». Поскольку подрастание естественной трещины из искусственного разреза является реальным процессом и сопровождается непрерывным сближением берегов трещины, то возникает вопрос: «Где надо считать расположенным конец трещины?». Этот вопрос касается и естественных трещин ЖБК, но в стандартах [15, 16] он не ставится. Таким образом, при экспериментальном определении параметра K_{IC} бетона необходимо: 1) учитывать подрастание естественной трещины из искусственного разреза, 2) обосновать расположение конца естественной трещины.

Цель работы – экспериментальное определение критического КИН K_{IC} обычных бетонов по методике, преодолевающей отмеченные недостатки стандартов [15, 16].

Методика экспериментов. Использовалась методика [3], согласно которой испытывались балочные образцы с затяжкой на четырёхточечный изгиб. Сечение образцов 15×15 см, длина 60 см, пролёт балки 45 см, зона чистого изгиба 15 см. Бетон обычный тяжёлый на портландцементе с максимальной крупностью заполнителя 20 мм. Образцы – призмы бетонировались в металлической опалубке, бетон уплотнялся вибратором и набирал прочность под влажным покрытием. Изготовлено и испытано 12 образцов, разделявшихся на 4 группы по 3 образца-близнеца. Группа образцов отличалась кубиковой прочностью бетона, которая на момент испытания равнялась 21,42; 32,15; 40,72; 50,24 МПа. Испытания проводились в возрасте 30 – 35 суток. Разрез глубиной $l_0 = 32-35$ мм и шириной 3 мм выполнялся дисковой электропилой посередине образца на одной из его граней. Перед нагружением к образцу крепилась затяжка из $2\text{Ø}14$ А240С с анкерами, упирающимися на торцы образца (рис. 1).

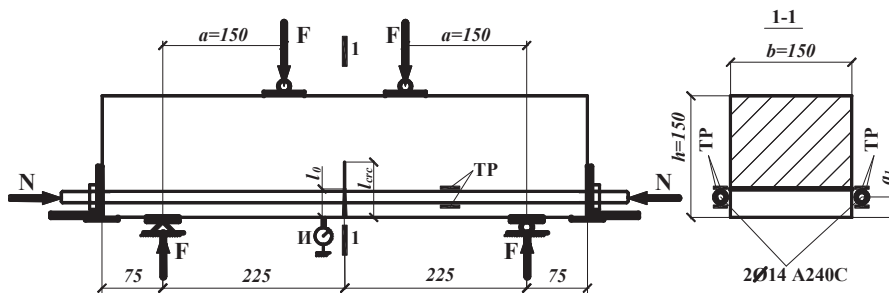


Рис. 1. Схема испытания опытных образцов. ТР – тензорезисторы, И – индикатор часового типа

На концах стержней затяжки имелись резьба, шайбы и гайки, посредством которых создавалось, равное примерно 50 МПа, предварительное напряжение затяжки. Контроль величины и одинаковости натяжения обеих стержней затяжки проводился по наклеенным на стержнях тензорезисторам ПКБ-20-

200 и прибору АИД-2м. Предварительно напряжённые образцы испытывались в гидравлическом прессе УИМ-50 при шкалах 50 и 100 кН.

Нагружение образцов проводилось с шагом нагрузки $2F$, обычно равным 0,5 кН. На каждом этапе нагружения измерялись деформации затяжки и прогиб образца вблизи середины пролёта (см. рис. 1), проводился осмотр боковых граней образцов с целью обнаружения естественной трещины. Наблюдение за подрастанием естественной трещины у конца искусственного разреза производилось при помощи микроскопа МПБ-2. На некоторой ступени нагрузки F трещина подрастания становилась неустойчивой и наблюдаемой невооружённым глазом. Как только трещина была замечена, увеличение нагрузки прекращали, оставляя её постоянной на достигнутом уровне. К моменту стабилизации нагрузки трещина успевала распространиться на некоторую длину и останавливалась вместе с прекращением роста нагрузки. Состояние остановки трещины и соответствующие ему нагрузка F , усилие затяжки N и длина трещины $l_{\text{кр}}$ (см. рис. 1) рассматривались как равновесно-критические (предельные), по которым вычислялся критический КИН K_{IC} . При фиксированной нагрузке F находился (см. ниже) и отмечался тупиковый конец трещины (по которому позже измерялась длина трещины $l_{\text{кр}}$), снимались отчёты по тензорезисторам на стержнях затяжки. Далее нагрузку увеличивали и после распространения трещины в новое равновесно-критическое состояние нагружение снова приостанавливали и проводили измерения указанного выше комплекса опытных величин. Обычно при испытании одного образца производили 1–2 указанных измерений. Когда длина трещины достигала 0,5 – 0,7 высоты сечения h , образец разгружали от поперечной нагрузки F , затяжка снималась и производилось последнее испытание образца силами F до разрушения. Таким образом, в процессе испытания одного образца получали 2–3 комплекса опытных величин, необходимых для определения K_{IC} . При этом 1–2 комплекса измерений соответствовало нагружению зоны исследования образца изгибающим моментом и продольной силой (при испытании с затяжкой) и 1 измерение при нагружении только моментом (при испытании без затяжки).

Конец трещины принимался в месте, где её раскрытие было равно 0,05 мм [4]. Для фиксации раскрытия трещины использовался микроскоп МПБ-2, а также шаблон фирмы SBETA. Раскрытие 0,05 мм как конец трещины принято на основании исследований [17], показавших, что трещины с раскрытием до 0,05 мм не являются серьёзным нарушением сплошности бетона, так как не снижают его эксплуатационные качества. Раскрытие этих трещин близко к раскрытию усадочных трещин и других естественных дефектов структуры бетона, не снижающих его прочности. Появление таких трещин на растянутой грани бетонных балок не вызывает их немедленное разрушение [18–20]. Такие трещины самоуплотняются, самозалечиваются в процессе эксплуатации конструкций, а при водонасыщении закрываются.

Результаты экспериментов. Для вычисления опытных значений $K_{\text{IC}}^{\text{test}}$

использовалась формула [3], полученная путём суперпозиции известных решений для КИН K_I [21, 22] при воздействии момента $M=Fa-N(h/2-a_1)$ и осевой силы $N<0$ (см. рис. 1).

На рис. 2 показаны полученные опытные точки и кривые зависимости характеристики K_{IC} от кубиковой прочности бетона $f_{cm,cube}$. Здесь же изображены эмпирические кривые $K_{IC} - f_{cm,cube}$, полученные в опытах [3]

$$\left. \begin{aligned} K_{IC} &= 0,091\sqrt{f_{cm,cube}}\sqrt{f_{cm,cube}} \text{ при } f_{cm,cube} \leq 35 \text{ МПа;} \\ K_{IC} &= 0,539(f_{cm,cube})^{0,25} \text{ при } f_{cm,cube} \geq 35 \text{ МПа;} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

и [5]

$$K_{IC} = 0,15 f_{cm,cube}^{0,64} \text{ при } f_{cm,cube} \leq 40 \text{ МПа.} \quad (2)$$

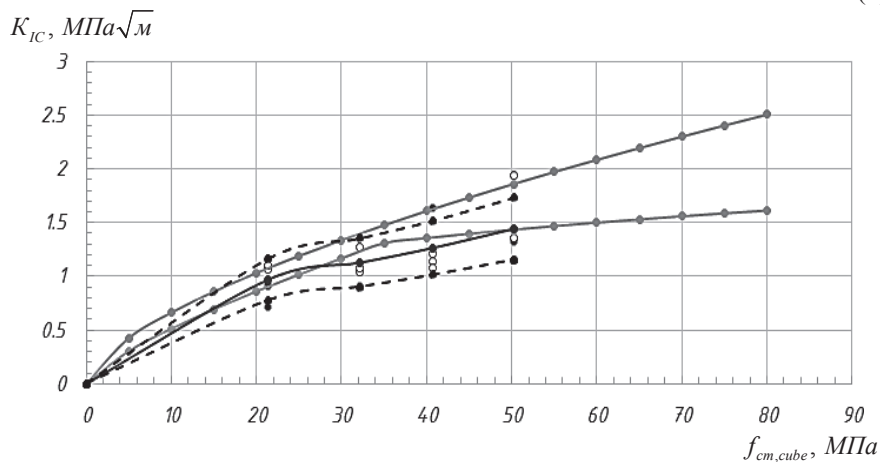


Рис. 2. Опытные точки испытанных образцов с затяжкой (•) и без затяжки (◦) и их средняя кривая (—●—). Кривые опытов [3] (—○—) и [5] (—●—). Границы 20% полосы (---)

Разброс опытных K_{IC}^{test} от средних значений по группам образцов получился умеренным и располагается, как правило, в 20% полосе (см. рис. 2). Полученные значения K_{IC}^{test} на исследованном интервале величин $f_{cm,cube}$ достаточно близки к данным [3, 5]. Статистические характеристики полученных опытных величин K_{IC}^{test} и отношений $K_{IC}^{test}/K_{IC}^{calc}$ ($K_{IC}^{calc}=K_{IC}^{Я}$ соответствует данным [5], $K_{IC}^{calc}=K_{IC}^M$ [3]) приведены в таблице 1.

Совпадение значений C_v для K_{IC}^{test} и отношений $K_{IC}^{test}/K_{IC}^{calc}$ для одной и той же группы образцов обусловлено свойствами [23] среднего арифметического и СКО в условиях проведенного сравнения.

Таблица 1*

Статистические характеристики опытных величин K_{IC}^{test}

Группа образ.	$f_{cm,cube}$, МПа	K_{IC}^{test} , Мпа(м) ^{0,5}			K_{IC}^{test} / K_{IC}^M			K_{IC}^{test} / K_{IC}^M		
		сред.	СКО	C_v	сред.	СКО	C_v	сред.	СКО	C_v
1	21,42	0,970	0,138	0,142	0,900	0,128	0,142	1,071	0,152	0,142
2	32,15	1,127	0,101	0,089	0,806	0,072	0,089	0,917	0,082	0,089
3	40,72	1,264	0,220	0,174	0,777	0,135	0,174	0,928	0,161	0,174
4	50,24	1,441	0,299	0,208	0,775	0,161	0,208	1,004	0,208	0,208
Среднее по группам образцов				0,153	0,814	0,124	0,153	0,980	0,151	0,153

* Примечание: СКО – среднее квадратическое отклонение, C_v – коэффициент вариации.

Кривые «Нагрузка F – прогиб V» опытных образцов (рис. 3) показывает проявление нелинейности при повышенных уровнях нагрузки, связанной с неупругостью, в основном, растянутой зоны бетона. Полученные кривые F–V близки к известным аналогичным кривым для подобных экспериментов, в частности [1, 2, 9].

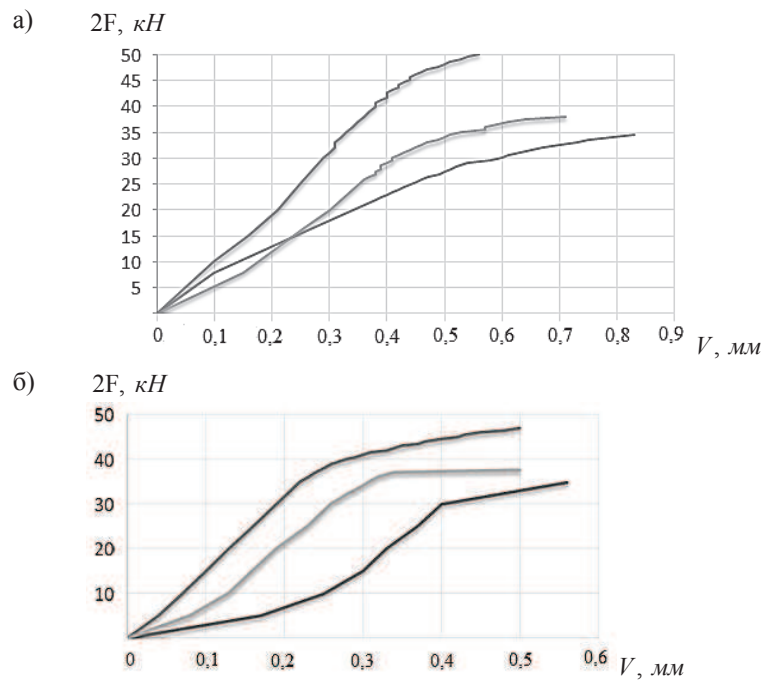


Рис. 3. Кривые «Нагрузка F – прогиб V» опытных образцов групп 1 (а) и 2 (б).

Выводы. Вследствие подрастания естественной трещины из искусственного разреза необходимо фиксировать конец трещины для уточнения её длины, требуемой при вычислении опытного значения K_{IC} . Предложено принимать конец трещины в месте её раскрытия, равного 0,05 мм, поскольку такое раскрытие имеют начальные микротрещины и другие дефекты структуры, не снижающие прочность и не нарушающие естественную сплошность бетона.

Использованная методика экспериментов отличается повышенной продуктивностью измерений, так как позволяет на одном и том же опытном образце неоднократно определить характеристику бетона K_{IC} при двух различных типах нагружения зоны исследования: при совместном действии усилий M и N и только M .

Проведенные эксперименты показали, что на исследованном интервале $f_{cm,cube} \leq 50$ МПа эмпирические формулы (1) и (2) дают близкие результаты. Но для высокопрочных бетонов формулы (1) и (2) заметно расходятся, имеющиеся данные малочисленны и здесь весьма актуальны экспериментальные исследования величины K_{IC} .

1. Kaplan M.F. Crack Propagation and Fracture of Concrete / M.F. Kaplan // *ACI Journal*. – 1961. – vol. 58, № 5. – pp. 591–610. 2. Nauss D.J. and Lott J.L. Fracture Toughness of Portland Cement Concrete // *ACI Journal*. – 1969. – vol. 66, № 6. – pp. 481–489. 3. Митрофанов В.П. Экспериментальное исследование характеристики сопротивления распространению трещин обычного тяжёлого бетона / В.П. Митрофанов, А.С. Жовнир // *Известия вузов. Строительство и архитектура*. – 1976. – №3 – С. 19–23. 4. Митрофанов В.П. Напряжённо-деформированное состояние, прочность и трещиностойкость железобетонных элементов при поперечном изгибе: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М.: ВЗИСИ, 1982. – 42 с. 5. Ягуст В.И. Сопротивление развитию трещин в бетонных конструкциях с учётом влияния макроструктуры материала: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М.: НИИЖБ, 1982. – 24 с. 6. Зайцев Ю.В. Моделирование деформаций и прочности бетона методами механики разрушения / Ю.В. Зайцев. – М.: Стройиздат, 1982. – 196 с. 7. Шевченко В.И. Применение методов механики разрушения для оценки трещиностойкости и долговечности бетона / В.И. Шевченко. – Волгоград: ВИСИ, 1988. – 110с. 8. Пересыпкин Е.Н. Расчёт стержневых железобетонных элементов / Е.Н. Пересыпкин. – М.: Стройиздат, 1988. – 168 с. 9. Alam M.R. Fracture toughness of plain concrete specimens made with industry-burnt brick aggregates / M.R. Alam, M.A. Azad and M.A. Kadir // *Journal of Civil Engineering (IEB)*. – 2010. – vol.38(1). – pp.81-94. 10. Курциляк М.М. Метод определения критического коэффициента интенсивности напряжения бетона эксплуатируемых железобетонных конструкций: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Магнитогорск: МГТУ, 2010. – 18с. 11. Kumar Sh., Concrete Fracture Models and Applications / Sh. Kumar, S.V. Barai. – Berlin – Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. – 284p. 12. Bressan J.D. Fracture Toughness and Strength of Fly Ash Concrete / J.D. Bressan, C. Effting, A. Tramoutin. Universidade do Estado de Santa Caterina (UDESC), 89.223 – 100. – Joinville.SC. – Brasil. – pp. 15-33. 13. ASTM. Standart test methods for determination of fracture toughness of advanced ceramics at ambient temperature. ASTM designation C1421 – 99. – Philadelphia: ASTM, 1999. – 120p. 14. RILEM Committee on Fracture Mechanics of Concrete (TC89-FMT). Determination of the fracture parameters (K_{IC} and $CTODc$) of plain concrete using three-point bend test //

Materials and Structures. – 1994, vol.23. – pp. 457–460. **15.** ДСТУ Б В. 2.7–227:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення характеристик тріщиностійкості (в'язкості руйнування) при статичному навантаженні. – 20 с. **16.** ГОСТ 29167–91. Бетоны. Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. – 20 с. **17.** Вербецкий Г.П. Прочность и долговечность бетона в водной среде / Г.П. Вербецкий. – М.: Стройиздат, 1976. – 120 с. **18.** Мальцов К.А. Физический смысл условного предела прочности бетона на растяжение при изгибе / К.А. Мальцов // Бетон и железобетон. – 1958. – №3. – С. 18–20. **19.** Blakey F. A Note on Strains Distribution in Concrete Beams / F. Blakey, F. Beresford // Civil Engineering and Public Works Review. – 1955. – vol. 5. – №586. pp. 20–35. **20.** Яковлева М.В. Исследование деформативных свойств бетона одного состава / М.В. Яковлева. Сборник научных трудов. Куйбышевский филиал ВЗИИТ. Вып.3.–Куйбышев: – Куйбышевское кн. изд., 1971. – С. 25–30. **21.** Сроули Дж. Методы испытаний на вязкость разрушения / Дж. Сроули, У. Браун / Прикладные вопросы вязкости разрушения. Сб. статей. Пер. с англ. – М.: Мир, 1968. С. 213 – 297. **22.** Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения / Г.П. Черепанов. – М.: Наука, 1974. – 640 с. **23.** Иванова В.М. Математическая статистика / В.М. Иванова, В.Н. Калинина, Л.А. Нешумова, И.О. Решетникова. – М.: Высш. шк., 1975. – 398с.

УДК 624.011

ДЕЯКІ ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ АРОК З КЛЕСНОЇ ДЕРЕВИНИ

SOME FEATURES OF CALCULATION ARCHES WITH LAMINATED WOOD

Михайловський Д.В. к.т.н. доцент; **Бабич Т.С.** магістр.(Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ)

Mihailovskiy D.V. the candidate of technical sciences, assistant professor;
Babych T.S. master. (Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv)

Розглянуто питання врахування деформованої схеми в арках з клесної деревини. Наведено результати чисельних досліджень з рекомендаціями щодо проектування арок з клесної деревини.

Examined the questions of taking into account deformed schemes in the arches of laminated wood. The results of numerical studies with recommendations for design the arches of laminated wood.

Ключові слова:

Клесна деревина, геометрична нелінійність, деформована схема, арка.
Laminated wood, geometric nonlinearity, deformed scheme, arch.