

УДК 624.012

О.О.ДОВЖЕНКО, В.В.ПОГРІБНИЙ, кандидати техн. наук, О.О.КУРИЛЕНКО  
*Полтавський національний технічний університет ім. Юрія Кондратюка*

## **ПРО МОЖЛИВІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕОРІЇ ПЛАСТИЧНОСТІ ДО РОЗРАХУНКУ МІЦНОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ ІЗ ВИСОКОМІЦНОГО БЕТОНУ**

Викладено порівняльний аналіз теоретичної міцності зразків із високоміцного бетону (зрізаних бетонних клинів, зразків Гвоздева, окремих шпонок) з дослідною та результатами експериментальних досліджень зазначених елементів.

Изложен сравнительный анализ теоретической прочности образцов из высокопрочного бетона (усеченных бетонных клинов, образцов Гвоздева, отдельных шпонок) с экспериментальной и результаты экспериментальных исследований указанных элементов.

The comparative analysis of the theoretical and experimental strength of the high-strength concrete specimens (concrete wedges, Gvozdev specimens, separate keys) and the results of the experimental investigation of the mentioned elements are expounded.

*Ключові слова:* високоміцний бетон, варіаційний метод теорії пластичності бетону.

Сучасна будівельна індустрія все більше використовує високоміцні бетони для зведення будівель і споруд. Починаючи з середини 70-х років ХХ ст. настав час модифікованих багатокомпонентних бетонів. Вони відрізняються такими перевагами як скорочення габаритів опалубки, витрат бетону й арматури, підвищення початкової міцності, щільності, водо- та газонепроникності, зносостійкості, корозійного захисту арматури, стійкості до хімічно-активних речовин.

У той же час, до недоліку зазначених бетонів можна віднести їх підвищену крихкість [1]. Чим вище міцність бетону, тим нижче його пластичні властивості – як при короткочасному, так і тривалому навантаженні. Випробування дослідних призм показують, що руйнується бетон практично раптово, без попереднього утворення поздовжніх тріщин (рис.1), властивих бетонам низької та середньої міцності.

Дані про основні міцнісні та деформативні характеристики високоміцних бетонів, виготовлених за традиційною технологією з використанням високомарочних цементів і ретельним підбором складових, подано в роботах О.Я. Берга, Г.М. Писанки, Є.М. Щербакова [1] та ін.

Основні концепції розвитку високоміцних модифікованих бетонів на основі модифікаторів розглянуто С.С. Капрієловим, А.В. Корсуном [2, 3] та ін.

Експериментальні дослідження деформативних і міцнісних властивостей високоміцних бетонів в Україні майже не виходили за межі випробувань невеликих моделей (в основному призм). Автоматично переносити їх параметри на реальні конструкції, без урахування масштабних

коефіцієнтів, навряд чи виправдано. Тому вичерпний аналіз характеристик високоміцних бетонів можна зробити лише після випробувань натурних конструктивних елементів і вузлів їх з'єднання.



Рис.1 – Характер руйнування дослідної призми

Дія ДБН В.2.6-98:2009 «Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення» розповсюджується на традиційні бетони і тільки в його розвиток передбачається розроблення нормативного документу «Бетонні та залізобетонні конструкції із високоміцного бетону (клас бетону на стиск вище С 50/60)». Отже, існує проблема розрахунку елементів із високоміцного бетону.

В ПолтНТУ розроблено варіаційний метод у теорії пластичності бетону для розрахунку міцності бетонних і залізобетонних елементів [4], який можна віднести до інженерних методів розрахунку, котрі приводять до дійсно простих залежностей, не потребують залучення складних комп'ютерних програм і знайшли широке розповсюдження в практиці проектування.

На кафедрі ЗБіКК та ОМ проводяться системні дослідження елементів, які працюють на сприйняття зрізуючих сил, зокрема із високоміцного бетону.

Метою даної роботи є перевірка можливості застосування варіаційного методу в теорії пластичності бетону для розрахунку міцності зазначених елементів.

Існує два способи отримання високоміцного бетону: виготовлення за традиційною технологією з використанням високомарочних цементів і ретельним підбором складових; реалізація ж другої концепції їх отримання виявилася можливою, насамперед, завдяки комплексному застосуванню суперпластифікаторів і мікрокремнезему. Оптимальне сполучення зазначених добавок – модифікаторів – дозволяє керувати реологічними властивостями бетонних сумішей і модифікувати структуру цементного каменю на мікрорівні так, щоб надати бетону властивостей, які забезпечують високу експлуатаційну надійність конструкцій. Введення суперпластифікаторів особливо ефективно знижує витрати цементу, оскільки цьому сприяють не тільки миттєве підвищення рухливості та покращення ущільнення бетонної суміші, але й те, що в цьому випадку постійність водопотреби зберігається при високих витратах цементу, тобто не потрібно додатково витрачати цемент для компенсації підвищеної в'язкості бетонної суміші. В результаті підвищується ефективність використання цементу у високоміцних бетонах [5]. В експериментальних дослідженнях, виконаних авторами, використовувалися обидві технології приготування бетонів.

Дослідні зразки у вигляді окремих шпонок виготовлялися за традиційною технологією з використанням високомарочних цементів, зрізані бетонні клини та зразки Гвоздева – із додаванням суперпластифікатору та мікрокремнезему (табл.1).

Таблиця 1 – Склад для приготування бетонної суміші

На 1м <sup>3</sup>	Модифіковані бетони	Традиційна технологія виготовлення
Цемент, кг	500 (M500)	500 (M700)
Пісок, кг	590	600
Щебінь, кг	1215	1000
Пластифікатор "Sika-Plast 2508", л	6,5	–
Мікрокремнезем "Sika-Fume", кг	35	–
Суперпластифікатор «ДокПласт», л	–	1
Вода, л	145	120
В/Ц	0,29	0,24

Програма експериментів включала:

– несиметричні зрізані клини, котрі завантажуються рівнодійною  $P_b$  поздовжньої  $N_b$  та поперечної  $Q_b$  сил за площадкою зрізання (рис.2) та моделюють стиснуту зону бетону над небезпечною похилою тріщиною. В одних зразках сила  $Q_b$  була направлена до прямого кута, а в інших – від нього. В дослідях кут прикладання навантаження  $\beta$  при постійному куті клина  $\alpha = 30^\circ$  змінювався в такій послідовності:  $-20^\circ$  ( $Q_b$  направлена до прямого кута),  $0^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $20^\circ$  (від прямого кута). Висота перерізу

зрізу клинів становила  $h_b \approx 40$  мм, товщина  $b \approx 150$  мм. Для запобігання руйнуванню нижньої частини зразків вона армувалася;

- зразки Гвоздева (4 близнюки);
- 5 хрестоподібних шпонок товщиною  $b_k=150$  мм і висотою  $h_k=200$  мм. Співвідношення їх розмірів становило  $l_k / h_k=0,25$ , що забезпечувало руйнування від зрізу. Арматура в каркасах залізобетонних шпонок підібрана таким чином, що 2 стержня, розташовані по середині висоти шпонки, за площею відповідають 4 стержням, розміщеним по 2 у верхній та нижній частинах шпонки (по два зразка-близнюка). Один зразок був бетонним.

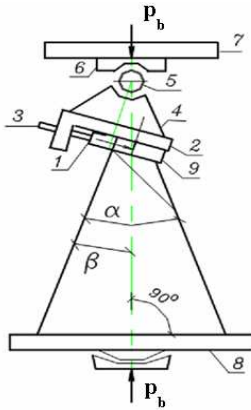


Рис.2 – Схема випробування зрізаних клинів:  
1, 2 – вантажні пластини; 3 – гвинти; 4 – корпус випробувального пристрою; 5 – шарнір; 6 – опорна пластинка;  
7, 8 – плити пресу; 9 – пластина.

Деформації бетону вимірювалися за допомогою тензорезисторів опору типу ПКБ, розміщених у місцях передбачуваної поверхні руйнування. Схема розташування датчиків на зразках наведена на рис.3. База тензорезисторів обумовлена локалізацією можливих пластичних деформацій у тонких шарах на руйнівній поверхні.

Під час випробування спостерігався зовні крихкий характер руйнування всіх дослідних зразків:

- зрізані бетонні клини руйнувалися за двома випадками (табл.2, п.1-2): при прикладанні зусилля  $Q_b$  до прямого кута із збільшенням кута завантаження  $\beta$  міцність клинів зменшується, у протилежному напрямку – навпаки (у межах руйнування за випадком 1 руйнівна поверхня виходить на грань прямого кута). З подальшим збільшенням кута  $\beta$  міцність клинів має зменшуватися – руйнування здійснюється за випадком 2 – руйнівна поверхня виходить на нахилу грань;

- у зразках Гвоздева (табл.2, п.3) горизонтальні тензорезистори фіксували зростання розтягуючих деформацій по мірі наближення до

центру перерізу; похилі, що розташовувалися найближче до вхідних кутів, – більш значні деформації стиску, руйнівна поверхня перетинала площину зрізу;

– характер руйнування шпонок із різним розташуванням арматури за висотою перерізу принципово не відрізняється (табл.2, п.4-5). Однак, рознесення арматури в два яруси призводить до збільшення деформацій стиску бетону до 50%. Крім того, арматура верхнього ярусу вступає в роботу раніше порівняно з центральним її розташуванням. В арматурі нижнього ярусу спостерігається нагельний ефект [6]. Міцність шпонок з подвійним армуванням до 10% більша порівняно з одинарним.

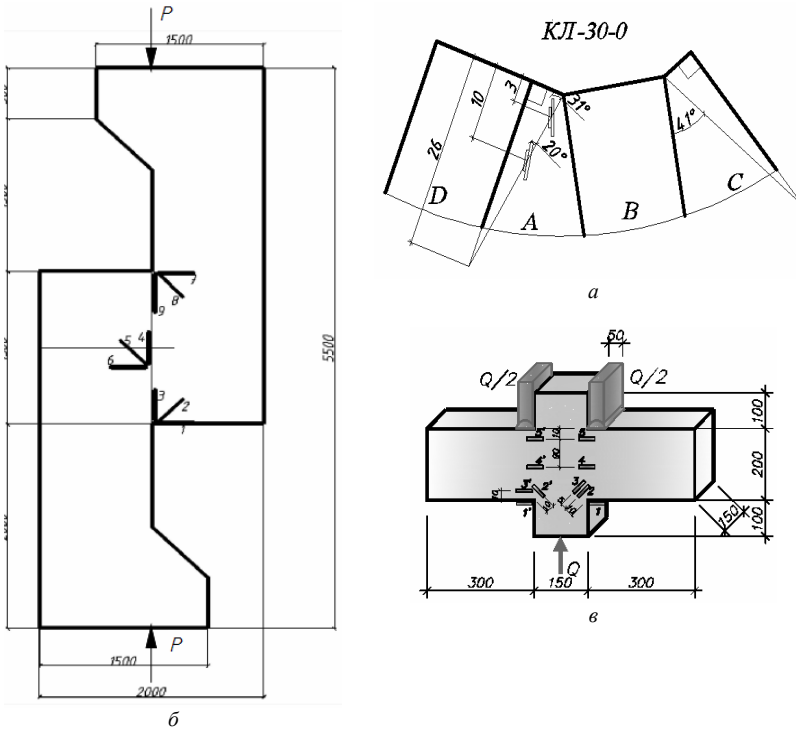
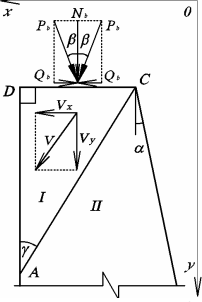

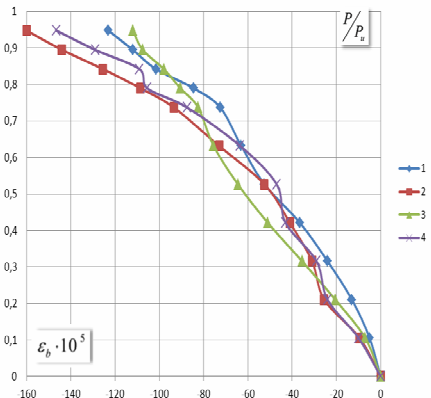
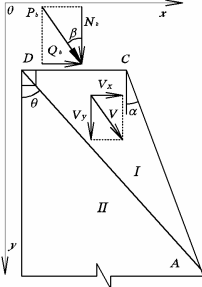

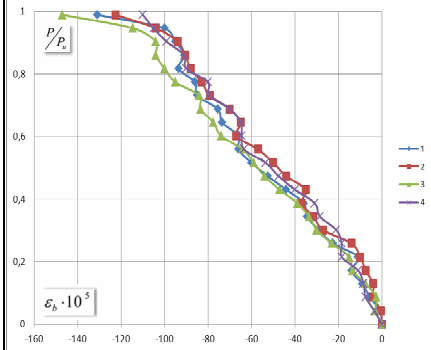


Рис.3 – Схема розташування тензорезисторів:

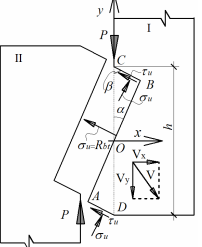
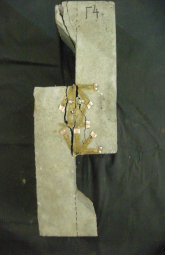
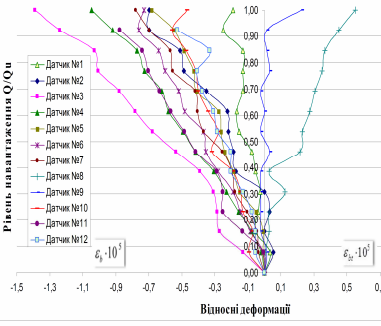
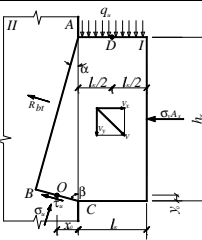

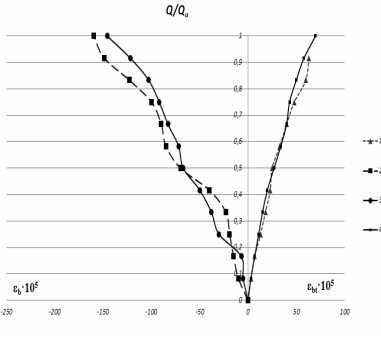
*a* – на зрізаних бетонних клинах (база 5 мм та 20 мм); *б* – на зразках Гвоздева (база 20 мм); *в* – на окремих шпонках (база 20 мм).

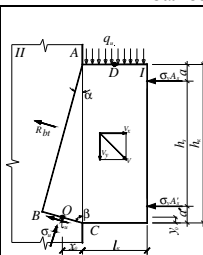

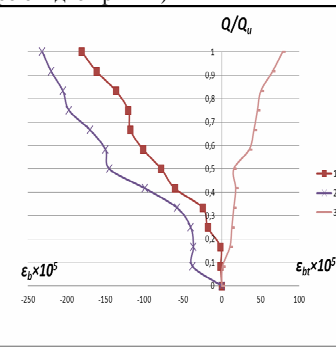
Для всіх елементів на стадіях, близьких до руйнування, залежність “ $Q/Q_u - \epsilon_b$ ” викривлюється, що свідчить про наявність локальних пластичних деформацій на руйнівній поверхні [6], які сягали  $\epsilon_{b,u}=160 \times 10^{-5}$  (табл.2).

Таблиця 2

№ п/п	Кінематично можливі схеми руйнування	Характер руйнування дослідних зразків	Залежність відносних деформацій бетону від рівня навантаження
1	2	3	4
Зрізаний бетонний клин (перший випадок руйнування)			
1	 <p>Дано: <math>h_b=DC</math>, <math>b</math>, <math>\alpha</math>, <math>\beta</math>,  <math>R_b</math>, <math>R_{bt}</math>                  Невідомі: <math>P_b</math>, <math>k=v_x/v_y</math>,  <math>\gamma</math></p>	 <p>КЛ 30-0</p>	
$P_b = m \left[ 2B \sqrt{(k - tg \gamma)^2 + 0,25(ktg \gamma + 1)^2} - (k - tg \gamma) \right] \times \frac{h_b b}{tg \gamma \cos \beta (1 \pm k_o k)}$ де $k_o = Q_b/N_b$ , $P_b = N_b / \cos \beta$ [7]			
Зрізаний бетонний клин (другий випадок руйнування)			
2	 <p>Дано: <math>h_b</math>, <math>b</math>, <math>\alpha</math>, <math>\beta</math>,  <math>R_b</math>, <math>R_{bt}</math>                  Невідомі: <math>P_b</math>, <math>k=v_x/v_y</math>, <math>\theta</math></p>	 <p>КЛ-30-20</p>	
$P_b = m \left[ \frac{2B \sqrt{(k - tg \theta)^2 + 0,25(ktg \theta + 1)^2}}{-(k - tg \theta)} \right] \times \frac{h_b b}{\cos \beta (tg \theta - tg \alpha) (1 + k_o k)} \quad [7]$			

Продовження табл.2

1	2	3	4
Зразок Г-воздева			
3	 <p>Дано: <math>h, b, R_b, R_{bt}</math> Невідомі: <math>P, k=v_x/v_y, \alpha, \beta</math></p>		
$P = m \left[ \frac{2B\sqrt{(k-tg\beta)^2 + 0,25(ktg\beta+1)^2} - (k-tg\beta)}{(k-tg\beta)} \right] \times \frac{hbtg\alpha}{(tg\beta+tg\alpha)} + \frac{hbR_{bt}tg\beta(k+tg\alpha)}{(tg\beta+tg\alpha)}$ <p>Обмеження: <math>\Sigma X=0</math> [8]</p>			
Залізобетонна шпонка (з арматурою в одному рівні)			
4	 <p>Дано: <math>h_k, b_k, l_k, A_s, \sigma_y, R_b,</math> <math>R_{bt}</math> Невідомі: <math>q_u, k=v_x/v_y, \alpha, \beta</math></p>		
$q_u = \left( m \left[ \frac{2B\sqrt{(k-tg\beta)^2 + 0,25(ktg\beta+1)^2} - (k-tg\beta)}{(k-tg\beta)} \right] \times \frac{tg\alpha}{(tg\alpha+tg\beta)} + R_{bt}(k+tg\alpha) \times \frac{tg\beta}{(tg\alpha+tg\beta)} + \frac{\sigma_y A_k}{b_k h_k} \right) \frac{1}{\gamma}$ <p>де <math>\gamma = \frac{l_k}{h_k}</math>;</p> <p>Обмеження: <math>\Sigma M_B = 0, \Sigma M_O = 0, \Sigma M_D = 0</math> [6]</p>			

1	2	3	4
Залізобетонна шпонка (з арматурою в двох рівнях)			
5	 <p>Дано: <math>h_k, b_k, l_k, A_s, \sigma_y, R_b, R_{bt}</math> Невідомі: <math>q_u, k=v_x/v_y, \alpha, \beta</math></p>		
$q_u = \left( \frac{m \left[ 2B \sqrt{(k-tg\beta)^2 + 0,25(tg\beta+1)^2} - (k-tg\beta) \right] \times \frac{tg\alpha}{(tg\alpha+tg\beta)} + R_m (k+tg\alpha) \times \frac{tg\beta}{(tg\alpha+tg\beta)} + \frac{1}{\gamma}}{\frac{\sigma_y (A_s + A'_s) k}{b_k h_k}} \right)$ <p>Обмеження: <math>\sum M_B = 0, \sum M_O = 0, \sum M_D = 0</math> [6]</p>			

Розв'язання задач міцності здійснюється шляхом пошуку мінімуму відповідної функції граничного навантаження з урахуванням обмежень, які представляють собою рівняння рівноваги (табл.2) методом Ньютона за допомогою підпрограми «Пошук рішення» в табличному процесорі «Microsoft Office Excel». Теоретична міцність (табл.3), обчислена варіаційним методом для 14 зразків, добре збігається з дослідною. Крім того в експериментах підтверджена наявність кінематичних механізмів, прийнятих у теоретичних рішеннях. Все це може слугувати підтвердженням можливості застосування теорії пластичності у розрахунках елементів із високоміцного бетону при зрізі.

Таблиця 3 – Порівняння теоретичної міцності зразків з експериментальною

№ п/п	Шифр зразка	b×h, мм <sup>2</sup>	R <sub>b</sub> , МПа	R <sub>bt</sub> , МПа	P <sub>b</sub> <sup>test</sup> , кН	$\frac{P_b^{test}}{bhR_b}$	P <sub>b</sub> <sup>calc</sup> , кН	$\frac{P_b^{calc}}{bhR_b}$	$\frac{P_b^{calc}}{P_b^{test}}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Зрізані клини									
1	КЛ 30-20	7350	52,9	3,2	248	0,638	259	0,666	1,04
2	КЛ 30-10	7475	52,9	3,2	310	0,784	317	0,802	1,02



Продовження табл. 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	КЛ 30-0	7474,5	52,9	3,2	380	0,961	397	1,004	1,04
4	КЛ 30-5	7599	52,9	3,2	500	1,244	448	1,114	0,90
5	КЛ 30-20	7525	52,9	3,2	465	1,168	440	1,105	0,95
Зразки Гвоздєва									
6	Г-1	15750	52,9	3,2	136,9	0,165	127,4	0,153	0,93
7	Г-2	15300	52,9	3,2	132,6	0,164	123,8	0,153	0,93
8	Г-3	15750	52,9	3,2	147,4	0,177	127,4	0,153	0,86
9	Г-4	15450	52,9	3,2	136,9	0,168	125	0,153	0,91
Окремі залізобетонні шпонки									
10	ОШ-3-В-6-1	2×32000	56,9	2,65	510	0,14	473,4	0,13	0,93
11	ОШ-3-В-а 0.34-1а	2×28275	56,9	2,65	480	0,15	514,8	0,16	1,07
12	ОШ-3-В-а 0.39-2а	2×29250	56,9	2,65	550	0,16	550,9	0,16	1,00
13	ОШ-3-В-а 0.34-1б	2×30000	56,9	2,65	600	0,18	546,2	0,16	0,89
14	ОШ-3-В-а 0.39-2б	2×30000	56,9	2,65	590	0,17	566,8	0,166	0,98
								n=	14
								X=	0,961

1.Берг О.Я. Высокопрочный бетон / О.Я. Берг, Е.Н. Щербаков, Г.Н.Писанко. – М.: Стройиздат, 1971. – 221 с.

2.Каприелов С.С. Общие закономерности формирования структуры цементного камня и бетона с добавкой ультрадисперсных материалов / С.С. Каприелов // Бетон и железобетон. – 1995. – №6. – С.16-20.

3.Корсун А.В. Напружено-деформований стан стиснутих залізобетонних елементів з високоміцних модифікованих бетонів, в тому числі в умовах нагрівання до +200<sup>0</sup>С: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / Артем Володимирович Корсун. – Макеевка, 2007. – 21 с.

4.Митрофанов В.П. Вариационный метод в теории идеальной пластичности бетона / В.П. Митрофанов // Строительная механика и расчет сооружений. – 1990. – №6. – С.23-28.

5.Баженов Ю.М. Технология бетона / Ю.М. Баженов. – М.: Высш. шк., 1978. – 455 с.

6.Довженко О.О. Застосування високоміцних бетонів у стикових з'єднаннях / О.О. Довженко, В.В. Погрібний, Л.В. Карабаш, О.О. Куриленко // Бетон и железобетон в Украине. – 2011. – №1. – С.2-4.

7.Довженко О.О. Теоретичні дослідження роботи бетону стиснутої зони над небезпечною похилою тріщиною / О.О. Довженко, Т.Ю. Качан // Зб. наук. праць. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво / ПНТУ ім. Ю.Кондратюка. – Вип.2 (24) – Полтава: ПолтНТУ, 2009. – С.26-33.

8.Довженко О.О. Дослідження опору бетону зрізу на зразках Гвоздєва / О.О. Довженко, В.В. Погрібний, Т.Ю. Качан // Коммунальное хозяйство городов: Науч.-техн. сб. Вып.90. – К.: Техніка, 2010. – С.267-272.

Отримано 08.06.2012