



УДК 624.012.4:539.422.2



**ДОВЖЕНКО О.О.**

Канд. технічних наук, доц.,  
Полтавський національний  
технічний університет імені Юрія  
Кондратюка, м. Полтава, Україна,  
e-mail: o.o.dovzhenko@gmail.com,  
тел. +38 (053) 222-98-75,  
ORCID: 0000-0002-2266-2588



**ПОГРІБНИЙ В.В.**

Канд. технічних наук,  
ст. науковий співробітник,  
Полтавський національний  
технічний університет імені  
Юрія Кондратюка, м. Полтава,  
Україна,  
e-mail: V.V.Pohribnyi@gmail.com  
тел. +38 (053) 222-98-7,  
ORCID: 0000-0001-7531-2912



**ЮРКО І.А.**

Канд. технічних наук,  
Полтавський національний  
технічний університет імені Юрія  
Кондратюка, м. Полтава, Україна,  
e-mail: ilona.yurko@gmail.com,  
тел. +38 (066) 934-52-70,  
ORCID: 0000-0003-3758-206X

## ЗРІЗ ЯК ФОРМА РУЙНУВАННЯ БЕТОНУ

### АНОТАЦІЯ

Викладено результати експериментальних досліджень зрізу як форми руйнування бетону. Наведено розподіл напружень і деформацій у зоні руйнування бетонних зразків, запропонованих О.О. Гвоздевим та Є. Мершем для вивчення явища зрізу, клинів, які моделюють стиснуту зону бетону над небезпечною похилою тріщиною згинальних елементів, окремих шпонок та шпоноківих з'єднань, бетонних призм при осьовому стиску. Встановлено фактори, що впливають на міцність. Систематизовано ознаки зрізової форми руйнування, наведено межі та умови її реалізації, обґрунтовано перспективність застосування теорії пластичності для розрахунку міцності при зрізі.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** міцність, зрізова форма руйнування, умова реалізації, розподіл деформації, фактор впливу.

### СРЕЗ КАК ФОРМА РАЗРУШЕНИЯ БЕТОНА

**ДОВЖЕНКО О.А.** Канд. технических наук, доц.,  
Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка, г. Полтава, Украина, e-mail: o.o.dovzhenko@gmail.com,  
тел. +38 (053) 222-98-75,  
ORCID: 0000-0002-2266-2588

**ПОГРЕБНОЙ В.В.** Канд. технических наук, ст. научный сотрудник, Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка, г. Полтава, Украина, e-mail: V.V.Pohribnyi@gmail.com,  
тел. +38 (053) 222-98-75,  
ORCID: 0000-0001-7531-2912

**ЮРКО И.А.** Канд. технических наук, Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка, г. Полтава, Украина, e-mail: ilona.yurko@gmail.com,  
тел. +38 (066) 934-52-70,  
ORCID: 0000-0003-3758-206X

### АННОТАЦИЯ

Изложены результаты экспериментальных исследований среза как формы разрушения бетона. Приведено распределение напряжений и деформаций в зоне разрушения бетонных образцов, предложенных А.А. Гвоздевим и Э. Мершем для изучения явления среза, усеченных клиньев, моделирующих сжатую зону бетона над опасной наклонной трещиной изгибаемых элементов, отдельных шпонок и шпоночных соединений, бетонных призм при осевом сжатии. Установлены факторы, влияющие на прочность при срезе. Систематизированы признаки срезовой формы разрушения, приведены условия и границы ее реализации, обоснована перспективность использования теории пластичности для расчета прочности при срезе.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** прочность, срезовая форма разрушения, условие реализации, распределение деформаций, фактор влияния.

### SHEAR AS A FORM OF CONCRETE DESTRUCTION

**DOVZHENKO O.O.** PhD, Ass. Prof., Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University, Poltava, Ukraine, e-mail: o.o.dovzhenko@gmail.com,  
tel. +38 (053) 222-98-75,



ORCID: 0000-0002-2266-2588.

**POHRIBNYI V.V.** PhD, Sen. Empl., Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University, Poltava, Ukraine, e-mail: V.V.Pohribnyi@gmail.com, tel. +38 (053) 222-98-75,

ORCID: 0000-0001-7531-2912.

**YURKO I.A.** Engineer, PhD, Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University, Poltava, Ukraine, e-mail: ilona.yurko@gmail.com, tel. +38 (066) 934-52-70,

ORCID: 0000-0003-3758-206X.

## ABSTRACT

The results of experimental studies of shear as a form of concrete destruction are presented. The distribution of stresses and deformations in the area of destruction of concrete samples proposed by O.O. Gvozdiev and E. Mersh, cut wedges, which are modeling the compressed area of concrete flexural elements over a dangerous inclined crack, individual keys and key joints, concrete prisms with axial compression is presented. The incompatibility of the phenomenon of "pure shear" as an individual case of plane stress condition and the form of destruction of a concrete element is substantiated, which excludes the possibility of applying the principle of "super positions" and determines the necessity to investigate various cases of the shear implementation. The factors that influence the strength of concrete elements with different geometric parameters of samples and load transmission schemes are determined. Thus, in case of a moment load scheme, the strength of an element depends on the ratio of length (depth) to the height of the console part, which determines the ratio of the bending moment to the transverse force volumes. The signs of the shear form of destruction are systematized; the conditions for its implementation are presented. A typical outline of the surface destruction at a shear in the form of a broken line in the presence of a tensile zone is established and changes of its parameters depending on the level of elements compression are fixed. Immediately prior to the destruction and at the stage of destruction, the localization of intense deformation in compressed zones in thin layers near the slip plane was detected, while the adjacent areas of the element remain slightly deformed. It is experimentally observed that for heterogeneous states at a shear the level of stress in the compressed zone is ahead of level in the tensile zone. The destructions occur in avalanche-like type along the whole cross-section, when the stresses reach limit values on the entire surface of the destruction, which is different from the detachable form. The boundaries of shear forms of concrete destruction are established. The perspectives of application of the theory of concrete plasticity for evaluation of the strength at the shear are indicated. The considered issues allow creating effective constructive decisions of the joints of elements of modern cast-in-place and precast construction.

**KEY WORDS:** strength, shear form of destruction, condition of implementation, distribution of deformations, factor of influence.

## ВСТУП

Бетон та залізобетон завдяки своїм перевагам широко затребуваний будівельний матеріал. У практиці будівництва розповсюджені бетонні та залізобетонні елементи, котрі працюють на сприйняття зусиль зрізу. Одним із основних напрямків створення ефективних конструктивних рішень є вдосконалення методів розрахунків несучої здатності на основі поглибленого вивчення явища зрізу бетону, встановлення меж його реалізації та врахування повної кількості характеристичних факторів впливу. Знання поведінки бетону при домінуванні дотичних напружень дозволить розв'язати питання забезпечення сумісної роботи елементів сучасних збірно-монолітних конструктивних систем за рахунок підвищення несучої здатності та надійності їх з'єднань.

## АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДЖЕРЕЛ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

На деформаційні властивості бетону в стадії руйнування суттєво впливає напружений стан елементів, а саме знак (стиск, розтяг) та величина гідростатичного тиску [1]. В свою чергу, залежно від інтенсивності деформації та розмірів областей її локалізації, поведінка бетону набуває рис, характерних як для крихких та псевдопластичних матеріалів, так і для квазіпластичних та навіть пластичних. При цьому руйнування відбувається за трьома формами: шляхом відриву, зрізу та роздроблення. Поводження бетону при відриві та роздробленні має однозначне описання та трактування. Стосовно зрізової форми руйнування у дослідників немає єдиної точки зору. Так, лавиноподібний зовні крихкий характер руйнування супроводжується досить інтенсивною деформацією в найбільш напружених зонах.

Останнім часом вивченню явища зрізу в бетоні присвячено низку наукових праць [1–7]. Поряд із зовнішніми проявами порушення цілісності тіла особливе значення має розподіл деформацій у зоні зрізу. При цьому слід відмітити, що зріз, який характеризується переміщенням однієї частини елемента відносно іншої вздовж поверхні руйнування, можливий лише за наявності на поверхні ковзання інтенсивної деформації [8]. В інших випадках відбувається відрив або роздроблення бетону. Між тим, візуально відрізнити зріз від відриву та роздроблення, а також встановити домінування дотичних напружень часом досить важко. Зрізова форма руйнування різноманітна, реалізується в згинальних та стиснутих елементах, при місцевій дії навантаження, за однорідних і неоднорідних (за наявністю зони розтягу) напружених станів, у елементах з різними геометричними формами та схемами передачі навантаження. Це вносить певні труднощі при виборі теоретичної основи, створенні та вдосконаленні методів розрахун-



ку елементів на зріз.

Виходячи з наведеного вище, встановлення області реалізації зрізу як форми руйнування бетону та оцінювання перспективності застосування теорій механіки деформованого твердого тіла, котрі найбільш точно описують поведінку всього різноманіття бетонних та залізобетонних елементів, є актуальним завданням.

### ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

За результатами експериментальних досліджень систематизувати ознаки зрізової форми руйнування бетону, встановити рівень та розподіл деформацій у зоні руйнування, послідовність досягнення напруження граничних значень при неоднорідних напружених станах, межі та умови реалізації зрізу, обґрунтувати застосування теорії пластичності для розрахунку міцності бетонних та залізобетонних елементів при зрізі.

### ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ

Як показують результати експериментальних досліджень [2, 5, 9, 10] зріз у бетоні реалізується на досить широкому інтервалі напружених станів і за значенням гідростатичного стиску, який визначає міру крихкості або пластичності матеріалу, займає проміжне місце між відривом та роздробленням. Міцність залізобетонного елемента при відриві залежить від коефіцієнта армування й опору арматури розтягу. Ефективне армування елементів дозволяє уникнути руйнування від відриву бетону. Міцність елемента при роздробленні визначається опором бетону, що працює в умовах нерівномірного стискання. Непряме армування підвищує міцність за рахунок створення обтиснення. При зрізі міцність залежить від опору як розтягнутої, так і стиснутої зон елемента, а також за наявності арматури від її впливу. Слід зазначити, що міцність різних елементів змінюється при збільшенні або зменшенні ступеня обтиснення (інтенсивності армування) неоднаково. Зазначене обумовлює необхідність подальшого вивчення явища зрізу в бетоні. Спроби встановити характеристику міцності бетону при «чистому зрізі» із подальшим застосуванням принципу «суперпозицій», накладаючи вплив бокового стиску та розтягу, не дали позитивного результату. Знайти зразок, в якому «чистий зріз» як окремий випадок напруженого стану та форма руйнування суміщаються, не вдалося. Так, при напруженому стані «чистий зріз» (рис. 1) зразки руйнуються шляхом відриву, а при зрізовій формі на поверхні руйнування діють дотичні та нормальні напруження.

Зразки, запропоновані О.О. Гвоздевим (рис. 2 а), випробовували за безмоментною схемою. Для передачі навантаження у площині зрізу в нижній та верхній частинах зразка влаштовували консолі. Поверхня руйнування мала вигляд ломаної, котра проходить біля площини зрізу, перетинає її посередині висоти зразка та співпадає з напрямком головних стискувальних напружень. Форма поверхні руйнування

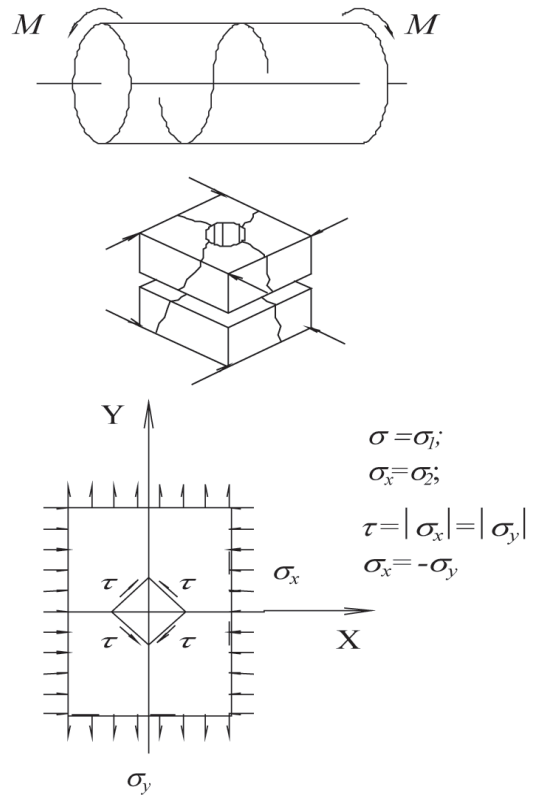


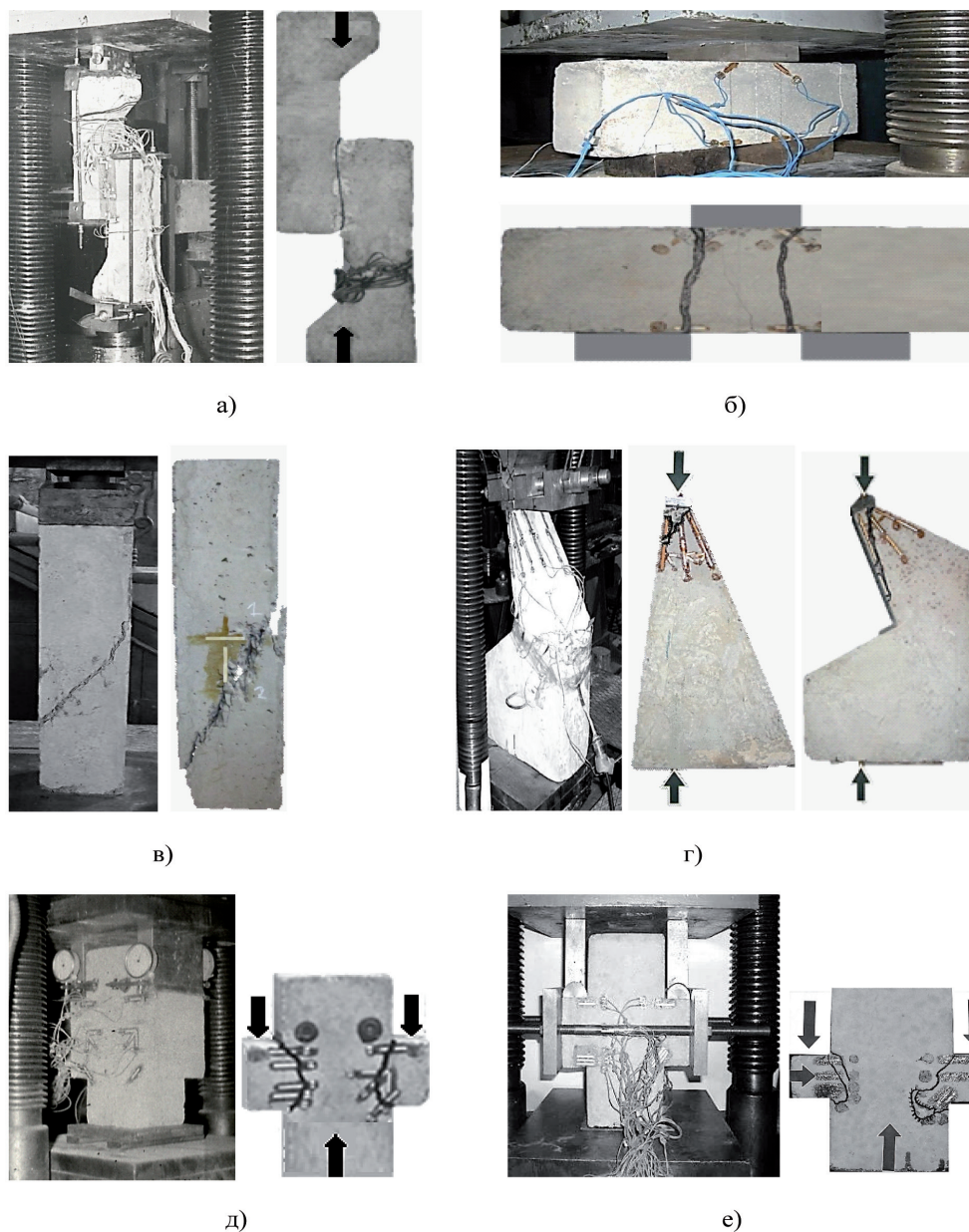
Рис. 1. Зразки, в яких реалізується напружений стан «чистий зріз»

зворотно симетрична відносно горизонтальної осі, що проходить через центр ваги зразка. Біля входних кутів, які визначають площадку зсуву, розташовані зони стиску з розмірами  $1/7,5 - 1/15$  її висоти. Між ними знаходиться зона розтягу. Співвідношення довжини ділянки стиску та ділянки розтягу залежить від відношення характеристик міцності бетону на розтяг та стиск  $f_{ct}/f_c$ . Кути нахилу ділянок стиску та розтягу до вертикалі складають відповідно  $30-40^\circ$  та  $5-10^\circ$ . Руйнування відбувається за цілим перерізом лавиноподібно зовні крихко шляхом взаємного переміщення малодеформованих зон у напрямку, котрий має горизонтальну та вертикальну складові. Про це свідчить обрис поверхні руйнування.

Зафіксований за допомогою датчиків опору розподіл деформацій бетону стиску та розтягу на ділянках поверхні руйнування рівномірний. Деформації в зонах стиску досягають значень  $1,8-2,3\%$ , у зоні розтягу  $0,2-0,25\%$  при класі бетону за міцністю С20/25. Інтенсивність деформації з наближенням до поверхні руйнування зростає, на що вказує аналіз показників тензорезисторів з базою 50 мм та 10 мм. Установлено локалізацію пластичної деформації в областях стиску.

Рівень деформацій та напружень у стиснутих зонах у процесі навантаження перевищує відповідний рівень у зоні розтягу. Напруження набувають граничних значень одночасно на всій поверхні руйнування. Міцність зразків визначають характеристики опору бетону  $f_c$  та  $f_{ct}$ . При  $f_c = 10,9$  МПа і  $f_{ct} = 1,12$  МПа опір бетону зрізу складає  $f_{sh} = 2,38$  МПа [9].

Зразки, запропоновані Є. Мершем (рис. 2, б), та-



**Рис. 2.** Зразки, в яких реалізується зрізова форма руйнування бетону: зразки О.О. Гвоздева (а); зразки Є. Мерша (б); призми (в); зрізані клини (г), завантажені на вершині дотичною та нормальною стискувальною силами; шпонки бетонні без обтиснення (д); шпонки бетонні обтиснуті (е)

кож руйнуються раптово зовні крихко. На відміну від зразків О.О. Гвоздева вони мають дві площини зрізу. Біля кожної з них у верхній частині зразка під зовнішньою гранню опорної площадки (навантаження подавалося знизу) розташована зона стиску. Вона має розміри  $1/10 - 1/5$  висоти зразка.

Розтягнута ділянка поверхні руйнування проходить від нижньої грані зразка до зони стиску, що обумовлено моментною схемою завантаження. Вершина ламаної поверхні руйнування зміщена від вертикальної площини зрізу до середини зразка. Кути нахилу ділянок стиску та розтягу до вертикалі складають відповідно  $25-40^\circ$  та  $4,5-10^\circ$ .

Розподіл деформацій та напружень і співвідношення їх рівня в зонах аналогічні розтягу та стиску зазначеним для зразків О.О. Гвоздева. Значен-

ня деформації стиску в стадії руйнування для бетону класу С20/25 при відношенні довжини площадки навантаження до висоти зразка  $l/h = 1/2$  складають  $2,3 - 2,9\%$ , що на 25% більше, ніж зазначені вище.

На міцність зразків Є. Мерша, крім характеристик  $f_{ct}$  і  $f_c$ , також впливає відношення  $l/h$ . Зі збільшенням  $l/h$  величина граничного навантаження та інтенсивність деформації зменшуються, а зріз переходить у відрив. Зрізова форма руйнування реалізується за умови  $l/h \leq 1$ . При  $f_c = 23,25$  МПа і  $f_{ct} = 2,28$  МПа опір бетону зрізу складає: за умови  $l/h = 1/2 - f_{sh} = 6,1$  МПа,  $l/h = 2/3 - f_{sh} = 5$  МПа і  $l/h = 1 - f_{sh} = 3,6$  МПа [9].

Зріз також має місце і при одноосному стисканні бетонних призм. Поверхня руйнування нахилена під кутом  $30 - 40^\circ$  до вертикалі (рис. 2 в) та варіює своє



положення за висотою. Характер руйнування зовні лавиноподібний. Пластичні деформації локалізуються на поверхні зсуву. При проходженні поверхні руйнування через тензорезистори інтенсивність зафіксованої ними деформації зростає. При цьому слід зазначити, що зрізова форма руйнування реалізується в призмах на всьому інтервалі класів бетону, в тому числі для високоміцних бетонів [10], пластичні властивості яких знижені.

Зрізані бетонні клини завантажувалися по верхній грані за допомогою спеціального пристрою, який розкладає вертикальну силу на дотичну  $T$  та нормальну  $N$  складові (рис. 2, г), що моделює роботу стиснутої зони бетону над небезпечною похилою тріщиною. Дотичні напруження направлялися як від прямого кута, так і до нього.

Міцність клинів залежить від напрямку  $T$  та відношення  $T/N$ : при напрямку  $T$  до прямого кута зі збільшенням  $T/N$  вона зменшується, при зворотному напрямку у випадку I (руйнування біля прямого кута) збільшується, а у випадку II (руйнування біля тупого кута) знижується. Кут клина не впливає на величину граничного навантаження при випадку I та підвищує її при випадку II. Зовнішній прояв явища зрізу та розподіл деформацій у клинах подібний до такого, що спостерігається в призмах. Зрізова форма руйнування при випадку II обмежується умовою  $\arctg T/N = \beta \leq \alpha + 5^\circ$ . За характеристик міцності бетону  $f_c = 24,8$  МПа і  $f_{ct} = 1,96$  МПа у I випадку руйнування опір клинів збільшується від  $f_u = 14,4$  МПа при куті  $\beta = -30^\circ$  (напрямок  $T$  до прямого кута клина) до  $f_u = 33,2$  МПа при куті  $\beta = 5^\circ$  (напрямок  $T$  від прямого кута). При II випадку руйнування опір клинів з кутом  $\alpha = 30^\circ$  зменшується від  $f_u = 29,5$  МПа при куті  $\beta = 20^\circ$  до  $f_u = 22,1$  МПа при куті  $\beta = 30^\circ$  [9].

Шпонкові з'єднання, як такі, що мають підвищену несучу здатність на зріз, представляють суттєвий практичний інтерес. Дані щодо геометричних параметрів, характеристик міцності та величини граничного навантаження окремих шпонок та шпонкових з'єднань надані в табл. 1.

Характер руйнування окремих бетонних шпонок (рис. 2 д), розподіл деформацій та напружень і фактори впливу міцності аналогічні наведеним для зразків Є. Мерша, але інтенсивність деформацій бетону стиску та міцність шпонок при однакових відношеннях  $l/h = l_k/h_k$  (де  $l_k$  та  $h_k$  – відповідно глибина та висота шпонки) на 15 – 20% нижчі. Шпонки мають максимальну несучу здатність при відношенні  $l_k/h_k = 0,25$ . Зріз також реалізується при збільшенні  $l_k/h_k$  до 0,5, а потім відбувається крихке руйнування

шляхом відриву з різким зниженням величини граничного навантаження й інтенсивності деформації.

При обтисненні шпонок вершина ломаної поверхні руйнування віддаляється від вертикальної площини зрізу (рис. 2 е). Стиснута зона біля нижнього вхідного кута шпонок та нахил ділянки розтягу поверхні руйнування збільшуються. Пластична складова деформацій бетону в зоні стиску зростає. Область реалізації зрізової форми руйнування розширюється до  $l_k/h_k = 1$ . Обтиснення підвищує міцність шпонок. При рівні обтиснення  $\sigma/f_c = 0,4$  міцність втричі збільшується.

Розглянемо армовані з'єднання (рис. 3).

Вони руйнуються як біля площини зсуву (рис. 3 а), аналогічно окремим шпонкам, так і за швом (рис. 3 б). При руйнуванні за шпонками реалізація зрізу аналогічна описаній вище для зразків Є. Мерша, а при руйнуванні за швом – для зразків О.О. Гвоздева.

Зріз за похилим перерізом реалізується до величини відношення ширини шву  $t$  до висоти шпонки  $t/h_k = 1$ .

На міцність армованих шпонкових з'єднань, крім зазначених вище факторів, впливає інтенсивність армування та відношення ширини шва до висоти шпонки. Армування аналогічно обтисненню підвищує несучу здатність, а збільшення відношення  $t/h_k$  її зменшує.

Аналіз зрізу як форми руйнування бетону дозволив класифікувати ознаки її реалізації (табл. 2). При цьому слід відмітити відповідність результатів експериментів передумовам застосування теорії пластичності [11], що обґрунтовує перспективність розроблення на її основі методології розрахунку несучої здатності бетонних та залізобетонних елементів, що працюють на сприйняття зусиль зрізу, з використанням екстремального критерію оцінювання граничного навантаження [12].

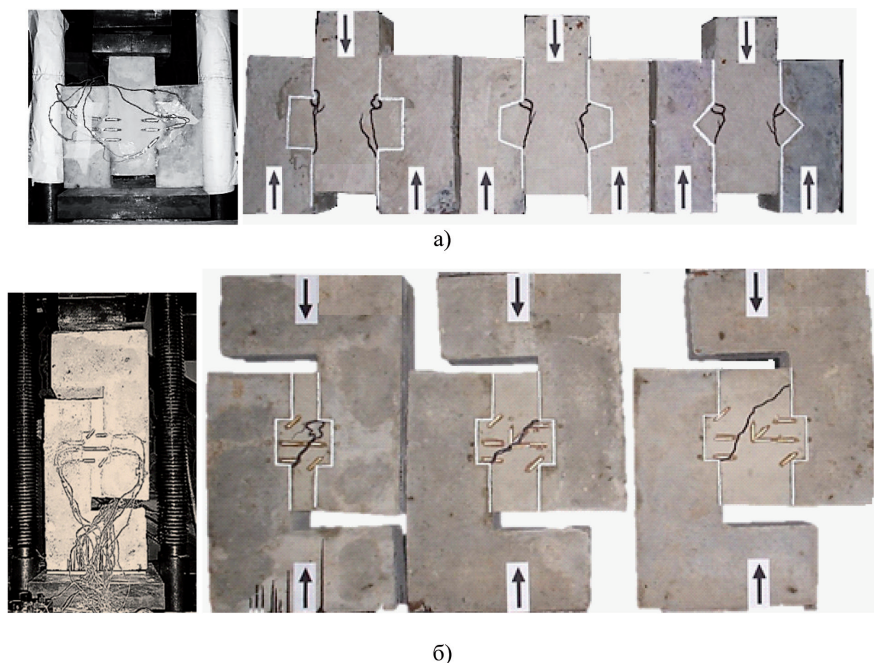


Рис. 3. Армовані шпонкові з'єднання: при руйнуванні за шпонками (а); при руйнуванні за швом (б)



Таблиця 1 - Параметри дослідних зразків окремих шпонок та шпонкових з'єднань

Шифр зразків	Розміри шпонок, мм			Кут нахилу грані, $\psi,^\circ$	Міцність бетону, МПа		Рівень обтиснення $\sigma$ , МПа	Поперечне армування		Ширина стілки, t, мм	Руйнівне навантаження $V_u$ , кН
	$h_k$	$b_k^*$	$l_k$		$f_c$	$f_{ct}$		кількість, $\varnothing$	$f_{yw}$ , МПа		
Ш-0,1-П-В	500										309
Ш-0,2-П-В	250										252
Ш-0,3-П-В	167										227
Ш-0,4-П-В	125										155
Ш-0,5-П-В	100										107
Ш-0,6-П-В	83										72
ШО-0,3-П-В-0,04	148	152						1,01			235
ШО-0,4-П-В-0,09	125	150						2,03			280
ШО-0,4-П-В-0,14	126	149						3,04			325
ШО-0,5-П-В-0,18								4,05			265
ШО-0,5-П-В-0,32	100	150						7,09			325
ШО-0,6-П-В-0,09	84	150						2,03			150
ШО-0,6-П-В-0,18	82	148						4,05			225
ШО-0,6-П-В-0,32	85	151						7,09			265
ШО-0,7-П-В-0,21	71	152	50	-	22,5	2,25		4,76	-	-	136
ШО-0,7-П-В-0,34	70	147						7,65			156
ШО-0,8-П-В-0,42	63	145						9,55			132
ШО-0,9-П-В-0,2		151						4,58			104
ШО-0,9-П-В-0,28	60	148						6,18			108
ШО-0,9-П-В-0,4	55	158						8,94			125
ШО-1,0-П-В-0,29	51	153						6,47			90
ШО-1,0-П-В-0,3	54	154						6,64			92
ШО-1,0-П-В-0,35	52	150						7,79			95
ШО-0,8-П-Л-0,34	61	147						7,96			130
ШО-0,8-П-Л-0,35	65	150			23,4	2,3		8,19			140
ШО-1,0-П-Л-0,32	50	154						7,49			98
ШЗ-0,5-П-Л		154		0							135
ШЗ-0,5-Тр-Л	100	147	50	17	15,7	1,28	-	2, $\varnothing 8$	280	-	135
ШЗ-0,5-Т-Л		151		45							150
ШЗ-0,25-П-Л-50		151								50	28
ШЗ-0,25-П-Л-100		158								100	30
ШЗ-0,25-П-Л-150	100	155	25	0	6,4	0,78	-	2, $\varnothing 8$	240	150	26
ШЗ-0,25-П-Л-200		153								200	20

\* – товщина зразка;

шифр зразків Х-ХХ-ХХХ-ХХХХ-ХХХХХ:

Х – Ш (шпонка), ШО (шпонка обтиснута), ШЗ (шпонкове з'єднання); ХХ –  $l_k/h_k$ ;

ХХХ – П (прямокутна), Тр (трапецієвидна), Т (трикутна); ХХХХ – В (важкий бетон),

Л (керамзитобетон); ХХХХХ – в серії ШО рівень обтиснення  $\sigma/f_c$ , в серії ШЗ ширина шва t

## ВИСНОВКИ

Зріз бетону відрізняє сполучення лавиноподібного зовні крихкого характеру руйнування з локалізацією пластичної деформації в зоні зсуву. Для його реалізації при неоднорідних напружених станах необхідно, щоб рівень напружень у стиснутих зонах випереджав

рівень напружень у зоні розтягу, і тим самим стримував їх розвиток. Таким чином, створюються умови одночасного досягнення граничного стану бетону на всій поверхні руйнування, яке відбувається за цілим перерізом, що є основною відмінністю зрізової форми від відриву та роздроблення.



Таблиця 2 - Ознаки зрізової форми руйнування бетону

Зовнішні ознаки руйнування	Характер руйнування	Напружений стан	Розподіл деформацій, рівень напружень	Домінуючий вплив
Зміщення окремих частин уздовж поверхні руйнування (поверхні зсуву); Руйнування за цілим перерізом одночасно у зоні стиску та розтягу	Раптовий лавиноподібний, без візуальної фіксації об'ємних деформацій або їх фіксації при контрольованому падінні навантаження	Змішаний напружений стан, наближений до одновісного стиску; осьовий стиск; двовісне нерівномірне стиснення	Пластична деформація локалізується у тонкому шарі на поверхні зсуву; інші зони залишаються малодеформованими, в процесі завантаження рівень напружень у стиснутій зоні випереджає рівень напружень у зоні розтягу	Дотичних напружень та пластичної деформації на поверхні руйнування

Зріз реалізується на досить широкому інтервалі напружених станів, які обмежуються за умови міцності бетону точками одновісного стиску та максимальних дотичних напружень у зоні нерівномірного стиску. Але його реалізація при осьовому стиску у виготовлених із високоміцного бетону призмах вказує на можливість зміщення зазначеної межі в область змішаних напружених станів для більш пластичних бетонів меншої міцності, а збільшення розміру зон пластичності при обтисненні вказує на можливість досягнення нормальними напруженнями більших значень ніж ті, які відповідають максимуму дотичних напружень, що розширює область реалізації зрізу. При моментній схемі передачі навантаження межа реалізації зрізу для окремих випадків різна та підлягає уточненню. Так, при руйнуванні бетонних шпонок вона встановлюється відношенням  $M/Vh_k = l_k/h_k = 0,5$ , а за наявності обтиснення або армування розширюється до  $l_k/h_k = 1$ , при діагональному зрізі за швом  $t/h_k = 1$ .

Систематизація ознак зрізової форми руйнування дозволяє засвідчити реалізацію зрізу.

Сумістити «чистий зріз» як окремий випадок напруженого стану та форму руйнування і тим самим установити єдину характеристику міцності бетону при зрізі неможливо. Це пояснюється відсутністю реальних площадок ковзання при напруженому стані «чистий зріз». Тому слід враховувати специфіку різних випадків зрізової форми на основі єдиного підходу до визначення міцності.

На несучу здатність бетонних і залізобетонних елементів та шпонкових з'єднань, які працюють на сприйняття зусиль зрізу, крім характеристик міцності бетону на стиск та розтяг, також впливають форма елементів, співвідношення їх розмірів, інтенсивність армування та рівень обтиснення.

Встановлено перспективність використання теорії пластичності для розв'язання задач міцності бетонних та залізобетонних елементів. Зовні крихкий характер руйнування бетону шляхом зрізу не є перешкодою

для застосування зазначеної теорії.

Створення ефективних конструктивних рішень шпонкових з'єднань на основі результатів вивчення специфіки зрізової форми руйнування та розроблення методології їх розрахунку дозволить забезпечити сумісну роботу елементів збірно-монолітних систем із залізобетону.

#### БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Mitrofanov V.P. The theory of perfect plasticity as the elementary mechanic pseudo-plastic ultimate state of concrete: bases, limitations, practical aspects. Improving Proc. of the 2<sup>nd</sup> fib. Congr., Naples, Italy, June 5–8, 2006. – P.7–6.
2. Falcon J.M. Experimental research on reinforced concrete dapped end beams: shear strength and serviceability behavior. Proc. of the 9<sup>th</sup> fib Intern. PhD Symp. in Civil Engineering, Karlsruhe, Germany, July 22–25, 2012. – P. 61–66.
3. Izni S.I., Khairul H.P., Mansoor H. and other. Ultimate shear capacity and failure of shear key. Malaysian J. of Civil Engineering. 2014. Iss. 26(3). – P. 414–430.
4. Muhaxheri M. Modeling coupling beams made of or retrofitted with HPRCCs. Proc. of the 9<sup>th</sup> fib Intern. PhD Symp. in Civil Engineering, Karlsruhe, Germany, July 22–25, 2012. – P. 137–143.
5. Lee Ch.H., Chin W.J., Choi E.S. & Kiml Y.J. An Experimental Study on the Joints in Ultra High Performance Precast Concrete Segmental Bridges. J. of the Korea Concrete Inst., 2011. Iss. 23(2). – P. 235–244.
6. Jorgenson H.B. & Hoang L.C. Load carrying capacity of keyed joints reinforced with high strength wire rope loops. In Proc. of fib Symp., 2015. – 13 p.
7. Nielsen M.P. & Hoang L.C. Limit Analysis and Concrete Plasticity. CRC Press, Taylor & Francis Group. 3rd ed., 2011. – 669 p.



8. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела / Ю.Н. Работнов. – М.: Наука, 1988. – 712 с.
9. Качан Т.Ю. Розрахунок міцності суцільних та склеєних залізобетонних (бетонних) елементів на зріз варіаційним методом: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. технічних наук: спец. 05.23.01 «Будівельні конструкції, будівлі та споруди» / Т.Ю. Качан. – Полтава, 2012. – 23 с.
10. Довженко О.О. Про можливість застосування теорії пластичності до розрахунку міцності елементів із високоміцного бетону / О.О. Довженко, В.В. Погрібний, О.О. Куриленко // Коммунальное хозяйство городов: Научно-технический сб. - Киев: Техника, 2012. - Вып. 105. - С. 74-82.
11. Митрофанов В.П. Про можливість застосування передумови про ідеальну пластичність до бетону / В.П. Митрофанов, О.О. Довженко, В.В. Погрібний // Вісн. ОДАБА. - Одеса, 2002. - №7. - С. 118–124.
12. Митрофанов В.П. Общая методика расчета прочности нормальных сечений железобетонных элементов на основе деформационной модели с двойственным экстремальным критерием прочности / В.П. Митрофанов, О.А. Довженко, В.В. Погрібной // Будівельні конструкції: Міжвідомчий науково-технічний зб. наукових пр. (буд-во). - Київ, 2005. - Вип. 62. - Кн. 1. – С. 197–204.
6. Jorgenson H.B. & Hoang L.C. (2015) Load carrying capacity of keyed joints reinforced with high strength wire rope loops. In Proc. of fib. Symp. – 13 p. [in English].
7. Nielsen M.P. & Hoang L.C. (2011). Limit Analysis and Concrete Plasticity CRC Press, Taylor & Francis Group. 3rd ed. – 669 p. [in English].
8. Rabotnov Yu.N. (1988). Mekhanika deformiruyemogo tverdogo tela [Mechanics of deformation of solid body]. - M.: Nauka. – 712 p. [in Ukrainian].
9. Kachan T.Yu. (2012). Rozrakhunok mitsnosti sutsil'nykh ta skleyenykh zalizobetonnykh (betonnykh) elementiv na zriz variatsiynym metodom [The calculation of the strength of solid and glued concrete (concrete) elements on a slice by a variational method]: Auth. abstr. for the degree of PhD on the specialty 05.23.01 - building constructions, buildings and constructions. Poltava. – 23 p. [in Ukrainian].
10. Dovzhenko O.O., Pohribnyi V.V. & Kurilenko O.O. (2012). Pro mozhlyvist' zastosuvannya teoriiy plastychnosti do rozrakhunku mitsnosti elementiv iz vysokomitsnoho betonu [On the possibility of applying the theory of plasticity to calculating strength of high-strength concrete elements] / Kommunal'noe khozyaystvo horodov: Nauchno-tekhn. sb. - K.: Technic. Iss. 105. – P. 74–82 [in Ukrainian].
11. Mytrofanov V.P., Dovzhenko O.A. & Pohribnyi V.V. (2002). Pro mozhlyvist' zastosuvannya peredumovy pro ideal'nu plastychnist' do betonu [About the possibility of applying the premise of ideal plasticity to concrete]. Visnyk ODABA. Odesa. Iss. 7. – P. 118–124 [in Ukrainian].
12. Mytrofanov V.P., Dovzhenko O.A. & Pohribnyi V.V. (2005). Obshchaya metodika rascheta prochnosti normal'nykh secheniy zhelezobetonnykh elementov na osnove deformatsionnoy modeli s dvoystvennym ekstremal'nym kriteriyem prochnost [General method for calculating the strength of normal sections of reinforced concrete elements on the basis of a deformation model with a dual extremal strength criterion]. Budivelni konstruktsiyi. Naukovo-tekhn. problemy suchasnoho zalizobetonu: Mizhvidomchyy naukovo-tekhn. zb. naukovykh prats' (budivnytstvo). - K. Iss. 62. Vol. 1. – P. 197–204 [in Ukrainian].

## REFERENCES

1. Mitrofanov V. (2006). The theory of perfect plasticity as the elementary mechanic pseudo-plastic ultimate state of concrete: bases, limitations, practical aspects. Improving Proc. of the 2<sup>nd</sup> fib Congr., Naples, Italy, June 5–8. – P.7–6 [in English].
2. Falcon J.M. (2012). Experimental research on reinforced concrete dapped end beams: shear strength and serviceability behavior. Proc. of the 9<sup>th</sup> fib Intern. PhD Symp. in Civil Engineering, Karlsruhe, Germany, July 22–25. – P. 61–66 [in English].
3. Izni S.I., Khairul H.P., Mansoor H., Bady A., Saim A.A. & Sarbini N.N. (2014). Ultimate shear capacity and failure of shear key. Malaysian Journal of Civil Engineering. Iss. 26(3). – P. 414–430 [in English].
4. Muhaxheri M. (2012). Modeling coupling beams made of or retrofitted with HPFRCCs. Proc. of the 9<sup>th</sup> fib Intern. I PhD Symp. in Civil Engineering, Karlsruhe, Germany, July 22–25. – P. 137–143 [in English].
5. Lee Ch.H., Chin W.J., Choi E.S & Kiml Y.J. (2011). An Experimental Study on the Joints in Ultra High Performance Precast Concrete Segmental Bridges. J. of the Korea Concrete Instit. Iss. 23(2). – P. 235–244 [in English].

Стаття надійшла до редакції 19.08.2017.