

УДК 624.012.45.044

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИЩИНОСТІЙКОСТІ І МІЦНОСТІ ПОХИЛИХ ПЕРЕРІЗІВ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК, ЗАВАНТАЖЕНИХ ЗОСЕРЕДЖЕНИМИ СИЛАМИ

EXPERIMENTAL STUDY OF CRACK RESISTANCE AND SHEAR STRENGTH OF REINFORCED POINT-LOADED CONCRETE BEAMS

Максимович С. Б. к.т.н., доц., Крочак О.В. к.т.н., доц. (Національний університет «Львівська політехніка»)

Maksymovych, S.B. PhD, senior teacher, Krochak, O.V. PhD, senior teacher (Lviv Polytechnic National University)

У статті розглянуті експериментальні дослідження похилих перерізів однопролітних залізобетонних балок, завантажених зосередженими силами при співвідношенні $a/d=0,5$. Випробувані балки мали однакові характеристики і відрізнялися тільки видами армування похилих перерізів. При аналізі експериментальних досліджень виявлено специфіку утворення і розвитку похилих тріщин у зоні дії поперечної сили і згинального моменту, вплив різних видів армування похилих перерізів на несучу здатність балок.

The issues of crack resistance and strength of reinforced concrete bending moment have been most comprehensively studied for the cases of simple bending and rather understudied for general cases of bending, despite the significant number of experimental and theoretical researches in this area. The recognized reinforced concrete scientists put this research lag down to the complexity of stress strain behaviour in areas concurrently loaded by the shear force and bending moment and to the lack of a reliable theory of concrete strength. This is actually the lack of a reliable theory of concrete strength that prevents laying down a theoretical base for solving this problem. This is why the research in this area is mostly experimental.

The paper discusses the experimental studies of oblique planes of simple-span point-loaded reinforced beams at $a/d=0.5$. The tested beams had identical characteristics and differed only in the type of reinforcement of the oblique planes. The analysis of the experimental studies revealed the specificities of nucleation and propagation of oblique cracks in the zones under the action of the shear force and bending moment. The effect of various types of reinforcement on the bearing capacity of the beams was also studied.

Ключові слова: залізобетонна балка, похилий переріз, похилі тріщини, армування, поздовжня арматура, поперечна арматура.
Reinforced concrete beams, oblique plane, oblique cracks, reinforcement, longitudinal reinforcement, transverse reinforcement

Вступ. Проблема міцності залізобетонних згинаних елементів найбільш повно опрацьовані для випадків чистого згину і зовсім недостатньо для загального випадку згину, хоча у цьому напрямку була проведена значна кількість експериментальних і теоретичних досліджень. Це пояснюється складністю напружено-деформованого стану на ділянках одночасної дії моменту і поперечної сили. На міцність похилих перерізів впливають більше десяти основних факторів. На нашу думку, найбільш суттєвий вплив при дії зосередженого навантаження має відношення a/d , хоча у чинних нормах проектування ДСТУ Б В.2.6-156:2010 [1] і у європейських нормах EUROCODE 2 (EC2) [2] цей параметр безпосередньо не знайшов відповідного відображення у розрахункових формулах.

Характер утворення і розвиток (морфологія тріщин, як назвав це явище проф. Буковський Б. [3]) похилих тріщин значно відрізняється від вертикальних тріщин, які є причиною дії розтягуючого зусилля або згинального моменту. При цьому похилі тріщини можуть бути значно небезпечніші тому, що проміжок часу від утворення тріщини до руйнування значно менший, ніж при чистому згині. У деяких випадках (у гнучких балках без поперечної арматури) руйнування по похилій тріщині може проходити миттєво після її утворення. Причиною такого руйнування Буковський Б. [3] вважає порушення зчеплення поздовжньої арматури з бетоном.

Аналіз останніх досліджень. Сьогодні переважає думка, що причиною руйнування залізобетонних балок по похилих перерізах є дія поперечних сил, а не сколюючих або головних розтягуючих напружень, як це трактувала “класична” теорія залізобетону. Тому норми проектування залізобетонних конструкцій більшості країн світу, у тому числі і чинні у нас ДСТУ Б В.2.6-156:2010 [1] і міжнародні – EUROCODE 2 (EC2) [2] для забезпечення від передчасного руйнування балки по похилих перерізах вимагають проведення розрахунку на дію поперечних сил і встановлення поперечної арматури.

Ще у 1953 році Лаупа А., Сісс К.П., Неумарк Н.М. [4] на базі проведеного аналізу попередніх експериментальних досліджень (починаючи з 1910р. до 1950р.) прийшли до висновку, що руйнування від “сколювання” (по похилому перерізу) відрізняється від руйнування від згину (по вертикальному перерізу) тільки тим, що висота стиснутої зони над похилою тріщиною є меншою за висоту стиснутої зони над вертикальною тріщиною, що підтверджують багаточисельні експериментальні дослідження. Тому руйнування проходить по похилій тріщині від роздавлювання стиснутої зони над нею, а не по вертикальній тріщині, над якою стиснута зона має більшу

висоту. Таке руйнування автори назвали сколюючо-стискаючим руйнування (Shear-Compression-Failure – англ.), а несуча здатність по похилому перерізу оцінюється не руйнуючою поперечною силою, а сколюючо-руйнуючим моментом (Shear-Compression-Moment – англ.). Автори запропонували емпіричні формули для визначення цього моменту (M_{su}) у балках прямокутного перерізу без поперечної арматури і при її наявності.

Найбільш обґрунтований підхід до визначення “сколюючо-руйнуючого” моменту - M_{su} має теорія Р. Вальтера [5], яка враховує висновки відомих експериментальних досліджень [6, 7] проведених у Штутгарті. Автор у [5] подає допоміжні графіки і таблиці для визначення проміжних параметрів, які входять в розрахункову формулу сколюючо-руйнуючого моменту - M_{su} .

Залізобетонна балка в стадії після утворення тріщин являє собою складну розрахункову схему. Похилі тріщини, по яких можливе передчасне руйнування балки, розвиваються, як правило, з початково утворених вертикальних тріщин у розтягнутій зоні балки, як це видно на рис.1.

Під дією змінного моменту внаслідок утворення вертикальних і похилих тріщин балка ділиться на окремі короткі блоки, які сполучені між собою в розтягнутій зоні поздовжньою арматурою, а у стиснутій зоні - бетоном цієї зони. При збільшенні навантаження в розтягнутій зоні згаданих блоків утворюються вторинні вертикальні і похилі короткі тріщини, внаслідок чого у стадії близькій до руйнування балки, її розтягнута зона покрита безліччю тріщин, що видно на рис.1. При недостатній кількості поперечної арматури напруження у поздовжній арматурі збільшується не пропорційно росту згинального моменту, очевидно, внаслідок часткової втрати зчеплення її з бетоном. При збільшенні навантаження одна з похилих тріщин значно видовжується, максимально розкривається на рівні поздовжньої арматури і, в певний момент, наступає руйнування балки по похилому перерізу від роздавлювання бетону над похилою тріщиною. В момент руйнування напруження у поздовжній арматурі не досягають межі текучості.

Такий характер утворення і розвитку тріщин веде до часткової втрати зчеплення поздовжньої арматури з бетоном і, як наслідок цього, розподіл розтягуючого зусилля у поздовжній арматурі по довжині балки не відповідає теоретичним значенням. В результаті часткової втрати зчеплення арматури з бетоном на шарнірну опору балки передається зусилля, значення якого залежить у першу чергу від характеру навантаження, яке діє на балку і кількості поздовжньої арматури. Нахил похилих тріщин до поздовжньої осі балки незначно відрізняється від кута 45° , що видно з рис.1.

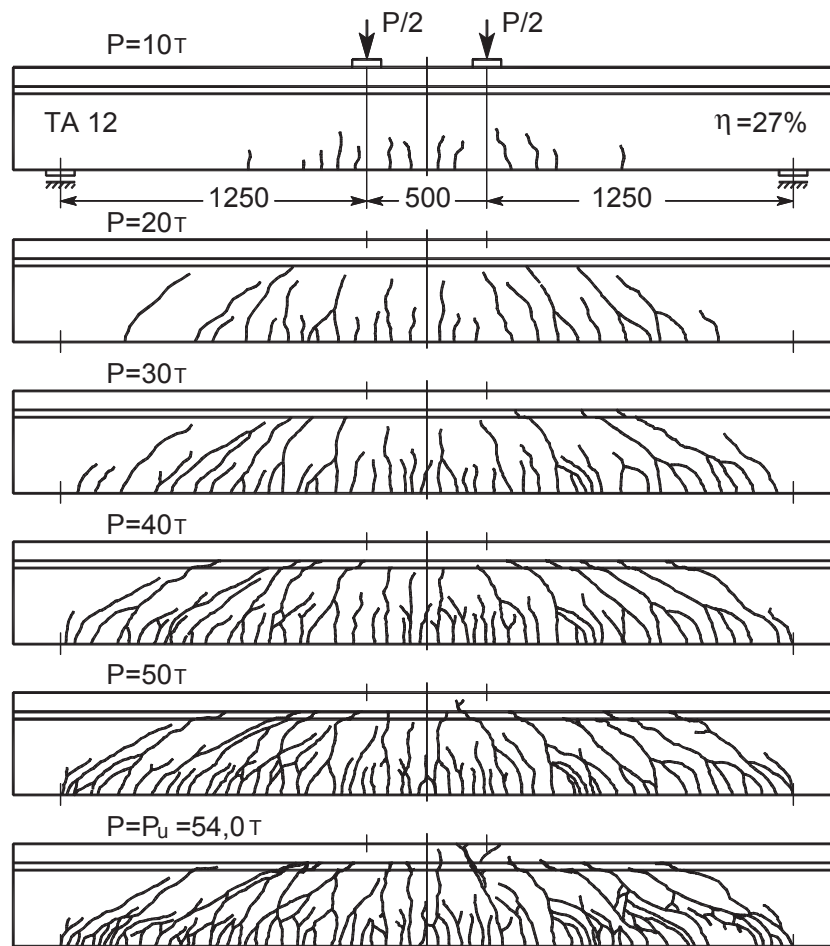


Рис.1. Утворення і розвиток тріщин в дослідях Ф. Леонгардта і Р. Вальтера (D.A.f.St, Heft 156, 1963).

Аналізуючи роботи [8, 9, 10, 11] ми прийшли до висновку, що поперечна сила не є критерієм, який може характеризувати тріщиноутворення і роботу похилих перерізів нерозрізних і розрізних балок. Хоча за чинними нормами [1] і EC2 [2] розрахунок поперечної арматури для цих двох випадків виконується однаково.

Постановка мети і задач досліджень. Метою досліджень є подальше вивчення міцності похилих перерізів залізобетонних балок для випадку коли зосереджена сила прикладена близько опори – при малих прольотах зрізу ($a/d \leq 1$). Висота дослідних зразків прийнята 400мм тому, що при висоті $h \geq 400$ мм відносна несуча здатність похилих перерізів балок залишається майже постійною: автори [4] рекомендують експериментальні дослідження з проблеми “сколювання” проводити на балках висотою не менше 400мм.

Методика випробувань. У відповідності з поставленим завданням була розроблена програма експериментальних досліджень. Програма експериментальних досліджень включала випробування 4-ох серії балок. Результати випробувань балок першої серії подані у статті [12]. В даній статті подано результати другої серії. Друга серія складалася з випробувань

8-ми однопротітних залізобетонних балок, завантажених засередженими силами, зі співвідношенням $a/d=0,5$.

Експериментальні зразки балок запроектовані розмірами $120 \times 400 \times 800$ мм. Схема випробувань балок показана на рис.2. Характеристики дослідних зразків балок подано в табл.1. Поздовжня нижня і верхня арматура прийнята по $4\varnothing 12$ А400С у всіх балках. Армуння похилих перерізів балок змінювалося в залежності від номера балки (рис.3).

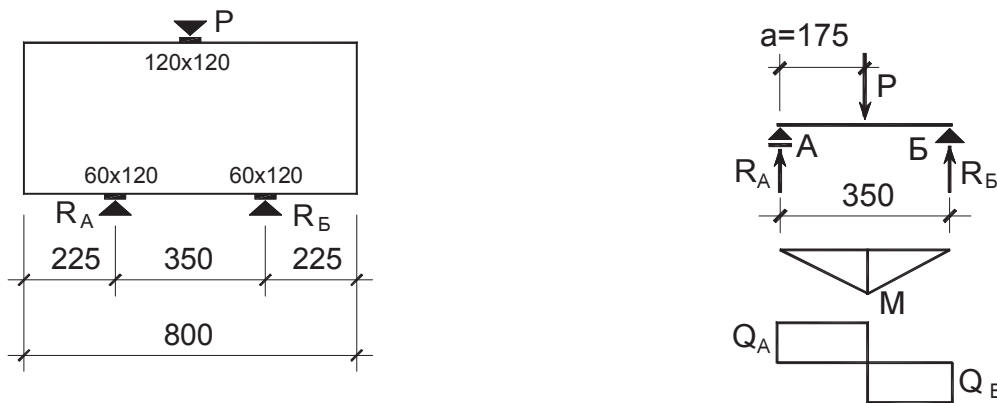


Рис.2. Схема випробування балок другої серії та епюри M і Q .

Наші дослідження балок дозволяють отримати необхідні експериментальні дані про порядок утворення, розкриття похилих тріщин і руйнування в зоні одночасної дії моменту і поперечної сили при малих прольотах зрізу ($a/d=0,5$):

- запропоноване армування похилих перерізів допоможе виявити вплив різних видів армування на міцність похилих перерізів залізобетонних балок при прольоті зрізу $a/d=0,5$.

- дослідження роботи балок № 1 і 2 покаже вплив поздовжньої арматури на міцність похилих перерізів.

- випробування дослідних зразків № 3, 4 і 5 дасть можливість виявити вплив процента армування вертикальними стержнями на міцність похилих перерізів.

- різні види армування похилих перерізів при однаковій витраті кількості поперечної арматури в балках № 5, 6, 7 і 8 дозволить виявити ефективний спосіб армування похилих перерізів.

Завантаження балок здійснювалося ступенями по 0,1 (100кН) від передбачуваного руйнівного навантаження. На кожному етапі замірялися деформації бетону, арматури і ширина розкриття вертикальних і похилих тріщин. Заміри деформації бетону і арматури виконувалися компоратором з базою 50мм.

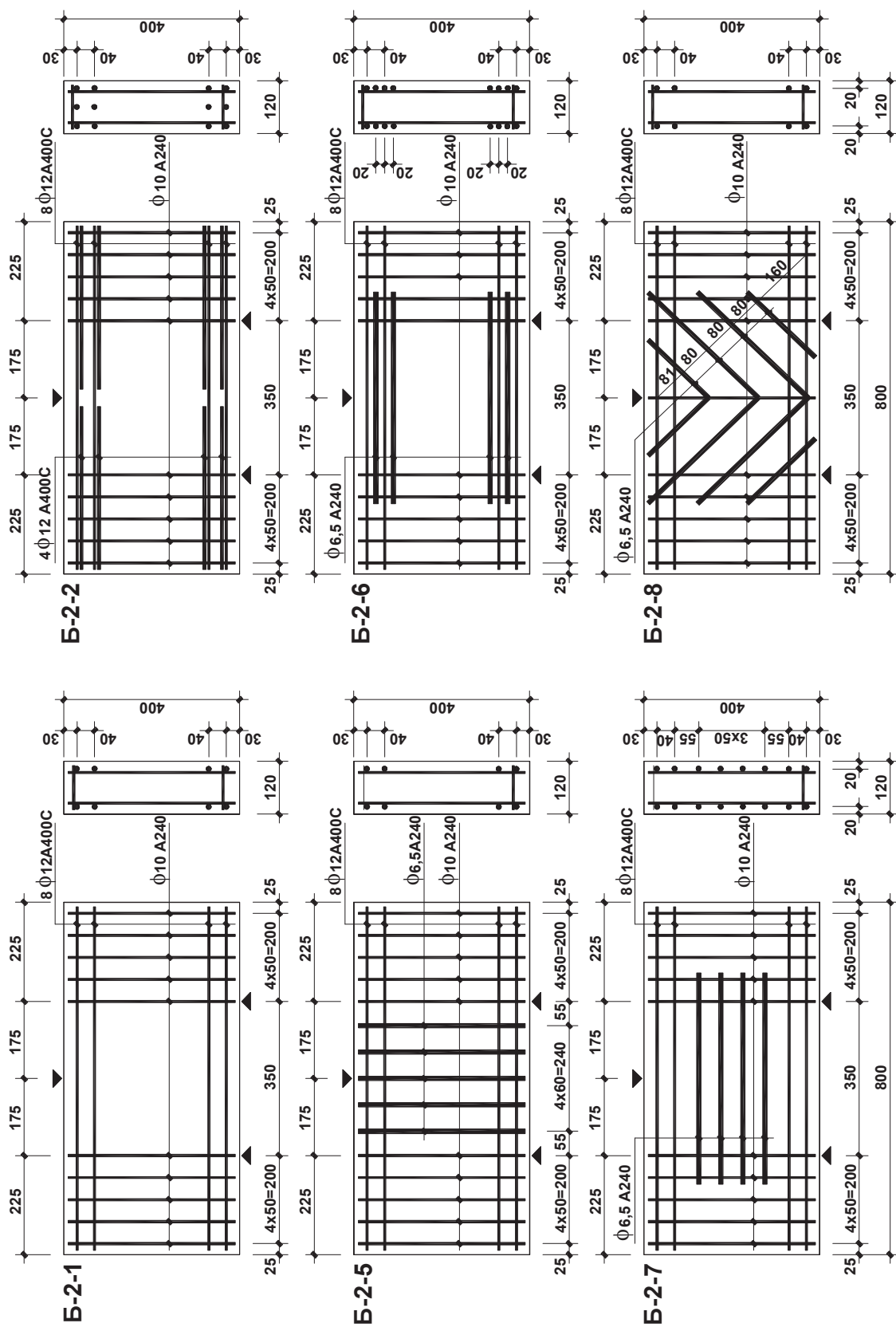


Рис.3. Конструкції дослідних зразків балок другої серії (похилі перерізи балок Б-2-3, Б-2-4, Б-2-5 армувалися вертикальними стержнями з різним кроком і діаметром поперечної арматури).

Таблиця 1

Характеристики дослідних балок другої серії

Марка балки	l , мм	b , мм	h , мм	d , мм	f_c , МПа	Поздовжня арматура			Поперечна арматура				
						арматура (верхня і нижня)	A_s , см ²	σ_T , МПа	ρ_f % (нижня)	арматура	S_w , мм	A_{sw} , см ²	σ_T , МПа
1	2	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Б-2-1	350	122	399	355	46,5	4Ø12 A400C	4,52	410,4	1,04	-	-	-	-
Б-2-2	350	124	400	354	46,5	4Ø12 A400C	4,52	410,4	1,03	Ø12 A400C	-	2,26	410,4
Б-2-3	350	124	400	349	46,5	4Ø12 A400C	4,52	410,4	1,04	Ø12 A240	70	2,26	254,1
Б-2-4	350	123	400	351	46,5	4Ø12 A400C	4,52	410,4	1,05	Ø10 A240	60	1,57	258,0
Б-2-5	350	124	402	355	46,5	4Ø12 A400C	4,52	410,4	1,03	Ø6,5 A240	60	0,664	262,0
Б-2-6	350	123	399	350	46,5	4Ø12 A400C	4,52	410,4	1,05	Ø6,5 A240	-	0,664	262,0
Б-2-7	350	124	401	352	46,5	4Ø12 A400C	4,52	410,4	1,04	Ø6,5 A240	50	0,664	262,0
Б-2-8	350	120	402	350	46,5	4Ø12 A400C	4,52	410,4	1,08	Ø6,5 A240	80	0,664	262,0

Результати досліджень. Результати експериментальних досліджень балок другої серії приведені в табл.2 з використанням позначень, прийнятих на рис.2.

Таблиця 2

Результати експериментальних досліджень балок другої серії

Марка балки	$a, \text{ мм}$	a/d	$P, \text{ кН}$	$R_A=R_B, \text{ кН}$	$M, \text{ кНм}$	$Q_A=Q_B, \text{ кН}$	Місце руйнування	Вид руйнування	№ тріщини
Б-2-1	175	0,49	1090	545,0	95,4	545,0	біля оп. А	по похилій тріщині	6
Б-2-2	175	0,49	1175	587,5	102,8	587,5	біля оп.Б		2
Б-2-3	175	0,50	1100	550,0	96,3	550,0	біля оп. А		2
Б-2-4	175	0,50	1120	560,0	98,0	560,0	біля оп. Б		3
Б-2-5	175	0,49	1115	557,5	97,6	557,5	біля оп.Б		2
Б-2-6	175	0,50	1100	550,0	96,3	550,0	біля оп. Б		3
Б-2-7	175	0,50	1100	550,0	96,3	550,0	біля оп. Б		2
Б-2-8	175	0,50	1120	560,0	98,0	560,0	біля оп.Б		2

Руйнування балок другої серії проходило приблизно однаково. Як правило, перші вертикальні тріщини утворювалися в середині прольоту при загальному навантаженні $P=300\text{кН}$. При $P=400\text{кН}$ утворилися інші прольотні вертикальні тріщини майже одночасно з похилими тріщинами. Похилі тріщини утворювалися деколи одночасно біля двох опор А і Б, а деколи з відставанням на один етап завантаження (100кН), що можна прослідкувати на рис.4.

Якщо похилі тріщини у балках першої серії [12] зароджуються посередині висоти балки, то зародження похилих тріщин другої серії проходило приблизно на $1/3h$ від нижньої грані балки, але також не доходили до нижньої і верхньої граней (рис.4). При збільшенні навантаження до 500кН спостерігалось утворення нових вертикальних тріщин, які все більше наближались до опор, а похилі тріщини продовжували розвиватися та збільшувати свою ширину розкриття.

Похилі тріщини при загальному навантаженні $P=600\text{кН}$ почали інтенсивніше розвиватися в сторону опор і прикладеної сили, в цей час як вертикальні тріщини уповільнили швидкість свого розвитку.

При $P=700\text{кН}$ похилі тріщини досягли нижньої грані балки, а вертикальні майже зовсім припинили свій розвиток. Збільшення навантаження до $P=900\text{кН}$, 1000кН і більше привело до об'єднання похилих тріщин між собою та інтенсивного зростання ширини їх розкриття, аж до руйнування балок по одній із цих похилих тріщин. Всі балки другої серії зруйнувалися по похилих тріщинах.

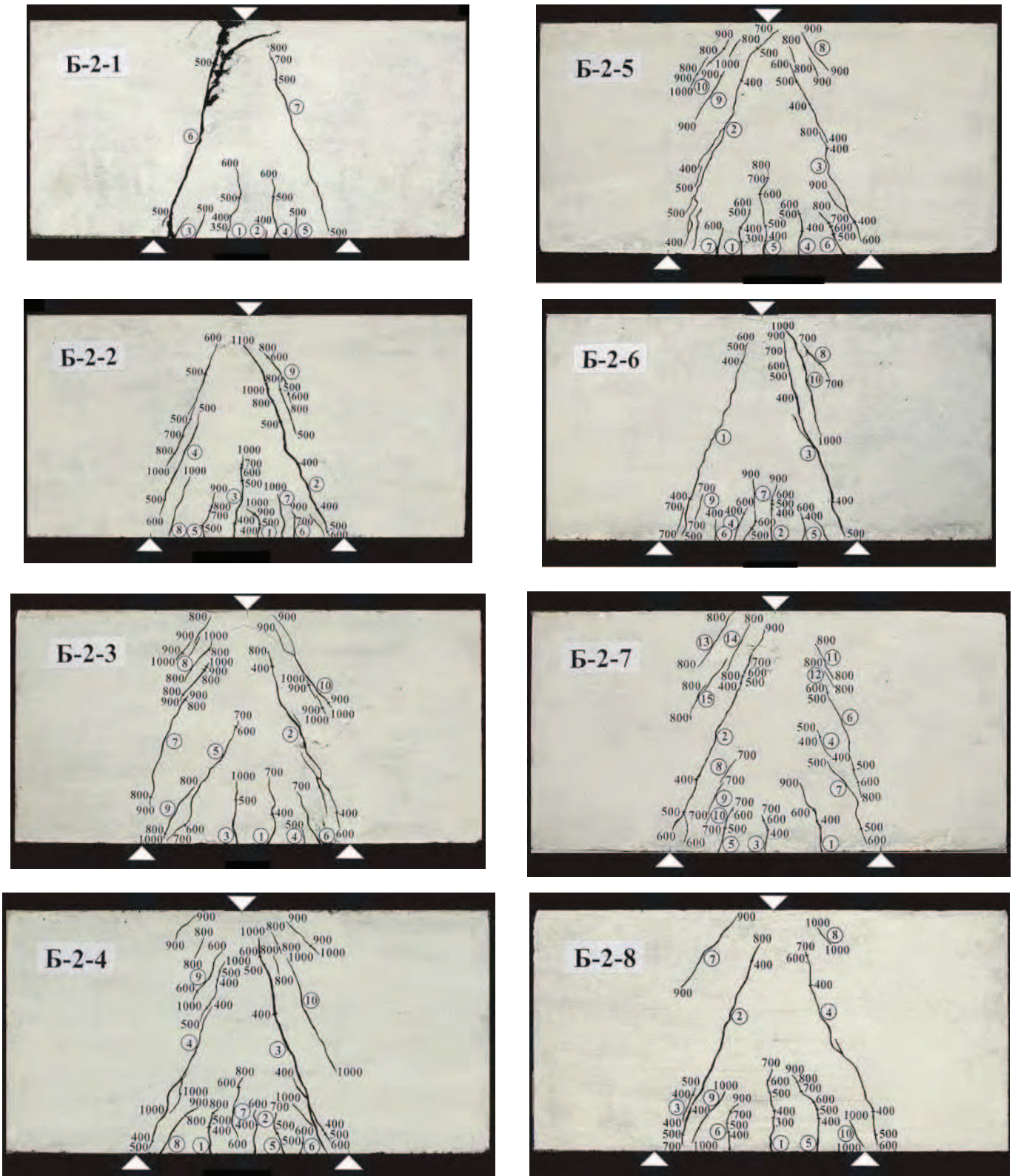


Рис.4. Характер утворення та розвиток тріщин і руйнування балок другої серії.

Висновки та рекомендації. На основі проведених експериментальних досліджень 8-ми однопролітних залізобетонних балок завантажених зосередженими силами можна зробити наступні висновки:

1. Різні види армування похилих перерізів не мають суттєвого впливу на момент утворення похилих тріщин, тобто похилі тріщини утворюються приблизно при однаковому загальному навантаженні.

2. У балках з однозначною епюрою згинальних моментів при прольоті зрізу $a/d=0,5$ похилі тріщини зароджувалися в середині висоти балки, ближче до нижньої грані.

3. Максимальна ширина розкриття похилих тріщин, з початку їх утворення і до руйнування балки, спостерігалася в місцях їх зародження.

4. У балках другої серії при відношеннях $a/d=0,5$ з однозначною епюрою згинальних моментів найбільш ефективною поперечною арматурою, з огляду на несучу здатність похилих перерізів і ширину розкриття похилих тріщин, є горизонтальна поперечна арматура.

5. Проведені експерименти показали відчутний вплив поздовжньої арматури на міцність похилих перерізів залізобетонних однопролітних балок.

1. ДСТУ Б В.2.6-156:2010. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування.— К. : Мінрегіонбуд України, 2011. – 118 с.

DSTU B V.2.6-156:2010. Konstruktsii budynkiv i sporud. Betonni ta zalizobetonni konstruktsii z vazhkooho betonu. Pravyla proektuvannia. – K. : Minrehionbud Ukrainy, 2011. – 118 s.

2. Eurocode 2: Design of Concrete Structures. EN 1992 – 1.1: General Rules and Rules for buildings. – Brussels : CEN, 2004. – 226 p.

3. Bukowski B. Morfologia rys w Konstrukcjach żelbetowych i betonowych. Archiwum Inżynierji Łądowej № 3-4/1957.

4. Laupa A., Siess C., Newmark N. The Shear Strength of Simpl Span Reinforced Concrete Beams without web Reinforcement. University of Illinois Civil Engineering Studies. Structural Research Series №52, 1953.

5. Walther R. Über die Berechnung der Schubtragfähigkeit von Stahl- und Spannbetonbalken. Schubbruchtheorie. Beton- und Stahlbetonbau 11/1962, pp.261-271.

6. Leonhardt F., Walther R. Beiträge zur Behandlung der Schubprobleme im Stahlbetonbau. Beton- und Stahlbetonbau 12/1961, 2, 3, 6, 7, 8/1962.

7. Leonhardt F., Walther R., Dilger W. Beiträge zur Behandlung der Schubprobleme im Stahlbetonbau. Beton- und Stahlbetonbau 1, 2, 4, 5/1965.

8. K. Herbert Kupfer Zusammenhang Zwischen Momenttendeckung und Schubsicherung beim Schlanken Plattenbalken. Beton und Stahlbetonbau 10/1967.

9. Залесов А.С., Зиганшин Х.А. Исследование прочности по наклонным сечениям элементов с двузначной эпюрой изгибающих моментов. Сборник научных трудов. Поведение бетонов и элементов железобетонных конструкций при воздействии различной длительности. Москва НИИЖБ, 1980, с.55-65.

Zalesov A.S., Zyhanshyn Kh.A. Yssledovanye prochnosty po naklonnym secheniyam elementov s dvuznachnoi epiuroi yzghybaiushchych momentov. Sbornyk nauchnykh trudov. Povedenye betonov y elementov zhelezobetonnykh konstruktsyi pry vozdeistvyu razlychnoi dlytelnosty. Moskva NYYZhB, 1980, c.55-65.

10. Шостак Б.А. Исследование трещиностойкости наклонных сечений ненапряженных железобетонных балок прямоугольного сечения при

кратковременном действии сосредоточенных нагрузок. Дисс. канд. техн. наук. Львов, 1971.

Shostak B.A. Yssledovanye treshchynostoikosty naklonnykh secheniy nenapriazhennykh zhelezobetonnykh balok priamouholnoho secheniya pry kratkovremennom deistvyu sosredotochennykh nahruzok. Dyss. kand. tekhn. nauk. Lvov, 1971.

11. Maksymovych S.B. Experimental study of crack resistance and strength of oblique planes of reinforced concrete point-force loaded beams with positive and negative bending moment diagram // Вісник Національного університету «Львівська політехніка»: Теорія і практика будівництва. – Львів, 2015. - №823. С.334-342.