

## БУДІВЕЛЬНІ КОНСТРУКЦІЇ

УДК624.012.25

### ВПЛИВ ЦИКЛІЧНОГО ЗНАКОЗМІННОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА МІЦНІСТЬ, ТРИЩИНОСТІЙКІСТЬ ТА ДЕФОРМАТИВНІСТЬ ПРОГІННИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ

В. М. Карпюк

*Поставлена і частково розв'язана наукова задача по створенню та дослідженню складного напружено-деформованого стану в залізобетонних балкових елементах під впливом короткочасного знакозмінного малоциклового навантаження.*

*Розкриті особливості напружено-деформованого стану дослідних зразків-балок, що зазнають малоциклового знакозмінного навантаження високих рівнів. Вперше встановлена залежність характеру і виду руйнування їхніх приопорних ділянок від відповідного співвідношення конструктивних чинників та факторів зовнішнього впливу.*

*Систематизовані відомі та виявлені нові схеми руйнування цих елементів при дії вказаного навантаження.*

**Ключові слова:** балка, експеримент, міцність, тріщиностійкість, деформативність, бетон, арматура, малоциклове знакозмінне навантаження

### ВЛИЯНИЕ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ЗНАКОПЕРЕМЕННОЙ НАГРУЗКИ НА ПРОЧНОСТЬ, ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ И ДЕФОРМАТИВНОСТЬ ПРОЛЕТНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В. М. Карпюк

*Поставлена и частично решена научная задача по созданию и исследованию сложного напряженно-деформированного состояния в железобетонных балочных элементах под влиянием кратковременной знакопеременной малоциклового нагрузки.*

*Раскрыты особенности напряженно-деформированного состояния опытных образцов-балок, испытывающих малоциклового знакопеременные нагрузки высоких уровней. Впервые установлена зависимость характера и вида разрушения их приопорных участков соответствующего соотношения конструктивных факторов и факторов внешнего воздействия.*

*Систематизированы известные и выявлены новые схемы разрушения этих элементов при воздействии указанной нагрузки.*

**Ключевые слова:** балка, эксперимент, прочность, трещиностойкость, деформативность, бетон, арматура, малоциклового знакопеременная нагрузка

### INFLUENCE OF CYCLIC ALTERNATING LOAD ON DURABILITY, FIRMNESS TO FORMATION OF CRACKS AND ABILITY TO BECOME DEFORMED FLIGHT REINFORCE-CONCRETE ELEMENTS

V. Karpiuk

*Posed and partially solved the problem by creating scientific and research complex stress-strain state of reinforced concrete beam elements influenced by alternating short malotsyklovoho load.*

*The features of the stress-strain state of prototypes girders experiencing little-cyclic alternating load highs. For the first time the dependence of the nature and type of the destruction of their neighborhood of reference sites on the proportion of structural factors and factors of external influence.*

*Systematized known and identified new schemes destruction of these elements under the action of said load.*

**Keywords:** beam, experiment, durability, firmness to education, ability to become deformed, concrete, armature, a bit multiple the repeated alternating load

## Вступ

Велика кількість прогінних залізобетонних конструкцій під час експлуатації зазнає дії малоциклових повторних та знакозмінних навантажень, які виникають в межах експлуатаційного рівня, а інколи й перевищують його. Такі явища виникають при вітрових, технологічних, сейсмічних, температурно-вологісних та інших впливах, а також під час реконструкції будівель та споруд, яка супроводжується зміною схеми завантаження та напружено-деформативного стану конструкції із залізобетону, який за оцінками фахівців залишиться ще, як мінімум, на 50 років основним будівельним матеріалом. Тому з метою підвищення ефективності капітальних вкладень існує реальна необхідність вдосконалення існуючих методів розрахунків нормальних і, особливо, похилих перерізів вказаних конструкцій на зазначені навантаження, насамперед, тому, що зміна знаку навантаження, його рівня та невизначене повторення в процесі експлуатації може призвести до наслідків, якісно відмінних від отриманих при розрахунку на стале навантаження одного знаку максимальної інтенсивності, на яке, власне, орієнтовані більшість діючих норм проектування.

**Постановка задачі.** Слід окремо зазначити, що якщо у діючих вітчизняних та закордонних національних нормах проектування навіть при сталому навантаженні закладені методи розрахунку міцності похилих перерізів прогінних конструкцій, далекі від досконалості за точністю та надійністю прогнозу і які значно «відстають» у цьому відношенні від методів розрахунку міцності нормальних перерізів, то вплив небагатоповторного циклічного знакозмінного і знакопостійного навантаження в них не ураховується зовсім, тим більше високого рівня, оскільки їх робота залишається ще недостатньо вивченою. Тому дослідження у вказаному напрямку являються важливими та актуальними.

**Аналіз останніх досліджень.** Розпочата ще понад 100 років тому назад дискусія про те, в що перетворюється залізобетонний елемент після утворення похилих тріщин: розпірну (A. N. Talbot) чи фермову (E. Mörsch) систему продовжується і нині. Подальші закордонні дослідження у цьому напрямку були спрямовані, в основному, на вдосконалення фермової аналогії E. Mörsch, P. E. Regan, F. Leonhardt, T. C. Zsutu та ін. А роботи I. Ramirez і I. Breen по модифікованій фермовій аналогії лягли в основу сучасного Eurocode 2, M. P. Collins та D. Mitchell по модифікованій теорії полів стиску - теперішніх канадських і норвезьких національних норм проектування.

Проте, подальший розвиток теорії залізобетону показав, що ці методи з огляду своєї умовності не відображають у достатній мірі дійсну роботу приопорних ділянок прогінних залізобетонних елементів. Тому в середині минулого століття під керівництвом О. О. Гвоздева спочатку В. І. Мурашевим, а потім М. С. Боришанським був створений новий метод розрахунку похилого перерізу на дію поперечної сили у стадії руйнування, який потім постійно вдосконалювався чисельними працями вітчизняних вчених, серед яких виділяються роботи О. С. Залесова, О. С. Зорича, В. С. Дорофєєва, Л. О. Дорошкевича, В. Г. Карабаша, Ю. А. Климова, В. І. Колчукова, В. П. Митрофанова, А. В. Петросяна, В. П. Чиркова та ін.

З метою вдосконалення методу розрахунку приопорних ділянок прогінних конструкцій у стадії руйнування в середині 80-х років минулого століття Ю. А. Климов і О. С. Залесов розробили фізичну модель залізобетонної балки, яка із суцільного тіла під навантаженням поступово перетворюється у дисково-в'язеву систему [1].

Проте, під час перегляду старих вітчизняних норм СНиП2.03.01-84\* автори нових російських стандартів [2], такі визнані фахівці, як О.С. Залесов, О.І. Звездов, Т.А. Мухамедієв, Є.О. Чистяков прийшли до висновку, що існуючі методи розрахунку міцності похилих перерізів залізобетонних конструкцій ще не досягли такого рівня, щоби їх можна було б прийняти у якості нормативних методів. Виходячи з цього, в нових російських нормах прийнята спрощена розрахункова схема приопорної ділянки прогінного залізобетонного елемента з метою створення додаткового запасу міцності.

Вигідно в цьому відношенні відрізняються праці О. Б. Голишева, А. М. Бамбури, О. І. Давиденка [3] та ін., в яких за допомогою деформаційного методу несуча здатність похилих перерізів прогінних конструкцій визначається через несучу здатність нормальних перерізів.

Знаходить застосування в практиці проектування залізобетонних елементів також метод Б. Г. Демчини, А.О. Дорошкевича, С.Б. Максимович [4] та ін., який також поєднує в собі розрахунок похилих і нормальних перерізів у традиційній постановці з використанням дослідних даних F. Leonhardt.

Далеко за межами України відомі роботи Є. М. Бабича [5], М. С. Торяника,

П. Ф. Вахненко, Г. Х. Масюка [6], В. П. Митрофанова [7,8], В. І. Колчунова [9], А. М. Павлікова [10], Й. Й. Лучка [11], В. С. Дорофєєва [12,13,14,15], М. І. Карпенка [16], В. І. Корсуна [17], В. М. Карпюка [18,19,20,21], Л. І. Стороженка, Д. А. Ярмоленка, П. С. Гомона [22], О. О. Заречанського [23], М. С. Зінчука [24], С. Х. Карапетяна [25], О. І. Корнійчука [26] по вивченню працездатності складнонапружених залізобетонних конструкцій в умовах одноразових, повторних малоциклових та інших навантажень, звичайних та підвищених температур тощо.

Є. М. Бабич та його учні малоцикловим називають навантаження, кількість повторення яких за весь термін служби складає десятки, сотні, а інколи й тисячі разів. В їхніх працях був встановлений критерій для визначення граничного числа повторних навантажень, суть якого полягає в стабілізації деформацій у бетоні, коли абсолютний приріст деформацій наступного навантаження незначно перевищує абсолютний приріст деформацій попереднього навантаження. Ними був зроблений важливий висновок про те, що основний процес деформування бетону закінчується після перших 10-ти циклів.

Початок дослідженням роботи залізобетонних елементів під дією знакозмінного навантаження, зафіксованих у доступній авторам науковій літературі, зробив В. Я. Немировський ще у 1949 році вивченням впливу знакозмінного навантаження на тріщиностійкість залізобетонних балок. Починаючи з 1961 року проблемою опору залізобетону дії циклічного навантаження зайнявся Л. П. Макаренко та його учні: Є. М. Бабич, Н. М. Бітько, А. В. Гергель, В. В. Масліченко, Г. Х. Масюк, В. Н. Рубель, І. Д. Свиначенко, Г. А. Фенко та інші.

Суттєвий внесок в розвиток науки про складний напружено-деформований стан залізобетону, зумовлений циклічним навантаженням у тому числі, зробили такі визначні фахівці та відомі вчені, як Т. Н. Азізов, В. С. Александровський, В. Я. Багрій, А. М. Бамбура, А. Я. Барашиков, О. Я. Берг, Г. Ф. Беченев, В. В. Блінков, З. Я. Бліхарський, О. П. Борисюк, А. І. Валовий, А. В. Войцеховський, О. С. Городецький, Б. Г. Гнідець, О. Б. Голишев, С. С. Гомон, П. С. Гомон, А. Б. Григорчук, В. О. Гришин, А. В. Гришин, О. І. Давиденко, В. С. Дорофєєв, Є. В. Жук, Н. І. Льчук, В. В. Караван, В. Г. Казачек, М. І. Карпенко, Р. І. Кінаш, І. Л. Корчинський, В. Г. Кваша, Є. В. Клименко, Ф. Є. Клименко, С. Ф. Клованич, О. І. Корнійчук, А. М. Кокарев, Ю. О. Крусь, В. С. Кукунаєв, В. І. Корсун, О. М. Кухнюк, Й. Й. Лучко, Л. Р. Майлян, Г. А. Молодченко, Р. Х. Мирмухамедов, Ю. І. Немчинов, Ю. М. Панчук, А. В. Перельмутер, А. П. Погореляк, В. А. Ржевський, В. В. Руденко, М. В. Савицький, О. В. Семко, Г. М. Ставров, С. А. Фомін, Т. Л. Чирва, Е. Д. Чихладзе, О. Л. Шагін, Б. Н. Шевченко, В. С. Шмуклер, О. Ф. Яременко, О. В. Яшин та ін.

Великий внесок у вивчення питань міцності та тріщиностійкості похилих перерізів прогінних залізобетонних елементів зробили такі відомі фахівці як М. С. Боришанський, Р. Вальтер, П. Ф. Вахненко, О. О. Гвоздев, Л. Г. Двоскіна, А. О. Дмитренко, Л. О. Дорошкевич, В. С. Дорофєєв, О. С. Залесов, О. С. Зорич, М. І. Карпенко, В. М. Карпюк, Ю. А. Климов, А. П. Кудзис, А. А. Кудрявцев, Л. Л. Кукша, Ф. Леонгардт, Г. М. Мамедов, Е. Мерш, В. П. Митрофанов, В. І. Мурашев, К. Ю. Ніколасв, П. Ріган, С. А. Тихомиров, М. С. Торяник, М. Н. Убайдулаєв, А. А. Цейтлін, Б. А. Шостак та ін.

Проведений авторами статті аналіз та подальші дослідження показали, що характер напружено-деформованого стану роботи і руйнування складнонапружених залізобетонних елементів під дією повторних навантажень високих рівнів суттєво відрізняється від прийнятих в указаних методах розрахункових схем і моделей, а наявних рекомендацій в опублікованих джерелах недостатньо для достовірного прогнозу їх міцності, тріщиностійкості та деформативності.

**Мета** даної роботи – виявити вплив знакозмінного малоциклового навантаження високих рівнів на міцність, тріщиностійкість та деформативність нормальних і похилих перерізів залізобетонних балочних елементів, а також поповнити банк експериментальних даних для вдосконалення інженерної методики їх розрахунку на деформаційній основі.

**Об’єкт дослідження** – однопрогінні непереармовані залізобетонні балки прямокутного перерізу без попереднього напруження з поперечним знакозмінним навантаженням високих рівнів у вигляді двох зосереджених сил, бетонні куби та призми.

**Предмет дослідження** – напружено-деформований стан, міцність, тріщиностійкість та деформативність нормальних і похилих перерізів прогінних залізобетонних елементів балочного типу з урахуванням дії конструктивних чинників та факторів зовнішньої дії.

Робоча *гіпотеза досліджень* полягає в розробці методології виконання системних

натурних і числових експериментів, що базуються на теорії планування, з використанням спеціального лабораторного устаткування для створення циклічного знакозмінного поперечного навантаження; *вивченні впливу* конструктивних чинників та факторів зовнішньої дії на несучу здатність дослідних елементів, а також у *виявленні залежності* можливих схем руйнування від відповідного співвідношення вказаних факторів; *розробці та вдосконаленні* нелінійних розрахункових моделей прогінних залізобетонних конструкцій з урахуванням дії вказаного навантаження, а також інженерної методики розрахунку їх міцності, тріщиностійкості та деформативності.

**Методика досліджень.** Згідно з прийнятою методологією натурний експеримент виконується за чотирьохфакторним трирівневим планом Бокса  $V_4$ . Варіювання факторів здійснювали за даними літературного огляду джерел, який показав, що найбільш впливовим фактором  $X_1$  є величина відносного прольоту зрізу  $a/h_0$ , яка змінювалась на трьох рівнях:  $a = h_0, 2 h_0$  і  $3 h_0$ . Другим за величиною впливу, як правило, є такий конструктивний чинник як клас важкого бетону:  $X_2 \rightarrow C 16/20, C 30/35, C 40/55$ , а третім – величина (кількість) поперечного армування на припорних ділянках:  $X_3 \rightarrow \rho_w = 0,0016; 0,0029; 0,0044$ . У якості четвертого прийнятий фактор зовнішньої дії  $X_4$  – рівень знакозмінного навантаження:  $\eta = \pm 0,50; \pm 0,65; \pm 0,80$  від фактичної несучої здатності, тобто величини поперечного навантаження, при якому ширина розкриття похилих тріщин  $w_k$  перевищувала 0,4 мм, а стріла прогинів  $f \geq l/150$ .

Дослідні зразки-балки зберігали у нормальних тепло-вологісних умовах при температурі  $20 \pm 2^\circ C$  і майже 100%<sup>III</sup> вологості повітря протязі 100..110 днів. Перед випробуванням на бокові поверхні балок наносили тонкий шар вапняного розчину з метою полегшення фіксації утворення та розвитку нормальних і похилих тріщин, а потім висушували їх до природної вологості.

Деформації бетону, арматури і прогини дослідних зразків вимірювали за допомогою індикаторів годинникового типу з ціною поділки, відповідно, 0,001 мм і 0,01 мм.

Випробування дослідних зразків здійснювали за схемою однопрогінної вільно обпертої балки, по чергово завантаженої то зверху, то знизу двома зосередженими силами без зміни її (балки) положення.

Перед основним експериментом спочатку по чергово випробували 25 дослідних балок (зразків-близнюків) першої серії на дію одноразового короткочасного ступеневого навантаження, практично, до руйнівного стану, коли ширина розкриття похилих тріщин і стріла прогинів перевищувала допустимі значення. Надалі випробували аналогічні дослідні балки другої серії на дію знакозмінного небогатоповторного поперечного навантаження вказаних високих рівнів. Заплановані також випробування таких же балок третьої серії на дію знакопостійного навантаження аналогічних рівнів.

Комплексним планом експериментів передбачені також повторні випробування підсиленних вуглепластиками похилих й нормальних перерізів майже зруйнованих дослідних зразків-балок другої і третьої серій на дію аналогічного попередньому навантаження.

Кількість циклів знакозмінного і знакопостійного навантаження продиктована критерієм стабілізації деформацій у бетоні С. М. Бабица та його учнів і складає не менше 10, якщо дослідні зразки-балки не зруйнувалися при меншому числі циклів.

Деякі результати випробувань дослідних зразків-балок першої і другої серій згідно з прийнятою методикою [27] представлені в таблиці 1 у вигляді руйнівної поперечної сили  $V_{u1,2} = F_{u1,2}$ , стріли прогинів  $f_{1,2}$ , максимальної ширини розкриття нормальних  $w_{k1,2}$  і похилих  $w'_{k1,2}$  тріщин, відносних деформацій крайніх фібр стиснутого бетону  $\epsilon_{c1,2}$ , розтягнутої  $\epsilon_{s1,2}$  та стиснутої  $\epsilon'_{s1,2}$  арматури на непарних (а) і парних (б) напівциклах.

Абсолютна більшість дослідних балок обох серій зруйнувалися за похилими перерізами в обох або одному (частіше) з прольотів зрізу. Критеріями руйнування дослідних зразків слугували: досягнення граничних значень деформацій в бетоні або арматурі, надмірне розкриття (до 1 мм) похилих (частіше) або нормальних (рідше) тріщин, суттєве збільшення (до 15 мм) стріли прогинів, відсутність приросту або деякий спад (до 15%) показників манометра насосної станції силової установки.

Як видно із табл. 1, несуча здатність балок як при одноразовому, так і при знакозмінному циклічному навантаженні різко зростає зі зменшенням відносного прольоту зрізу. При цьому, змінюється також і характер їх руйнування: при великих ( $a/h_0=3$ ) і середніх ( $a/h_0=2$ ) прольотах зрізу - за схемами С/В або В/М [19,20], тобто за похилою тріщиною від переважної дії поперечної сили або згинального моменту, а при малих прольотах зрізу - за схемою Д//см, тобто похилою стислою смугою.

Збільшення класу бетону від С16/20 до С40/50 не призводить до пропорційного збільшення несучої здатності приопорних та інших ділянок дослідних зразків-балок, очевидно, тому, що міцність бетону на розтяг зростає, при цьому, повільніше, ніж на стиск.

Таблиця 1 – Результати випробувань дослідних зразків-балок першої і другої серій

№ досліду	a/h <sub>0</sub> , мм	C, МПа	ρ <sub>sw</sub> (Ø ВрІ)	η	2F <sub>ult</sub> , кН	f <sub>1</sub> , мм	W <sub>k1</sub> , мм	W <sub>k1</sub> , мм	ε <sub>c1</sub>	ε <sub>s1</sub>	ε <sub>s1</sub>
					η · F <sub>ult</sub> , кН	f <sub>2</sub> , мм	W <sub>k2</sub> , мм	W <sub>k2</sub> , мм	ε <sub>c2</sub>	ε <sub>s2</sub>	ε <sub>s1</sub>
1	525	C40/50	0,0044 (2 Ø5)	±0,80	-	-	-	-	-	-	-
2	525	C40/50	0,0044 (2 Ø5)	±0,50	-	-	-	-	-	-	-
3	525	C40/50	0,0016 (2 Ø3)	±0,80	-	-	-	-	-	-	-
4	525	C40/50	0,0016 (2 Ø3)	±0,50	-	-	-	-	-	-	-
5	525	C16/20	0,0044 (2 Ø5)	±0,80	-	-	-	-	-	-	-
6	525	C16/20	0,0044 (2 Ø5)	±0,50	-	-	-	-	-	-	-
7	525	C16/20	0,0016 (2 Ø3)	±0,80	-	-	-	-	-	-	-
8	525	C16/20	0,0016 (2 Ø3)	±0,50	-	-	-	-	-	-	-
9	175	C40/50	0,0044 (2 Ø5)	±0,80	-	-	-	-	-	-	-
10	175	C40/50	0,0044 (2 Ø5)	±0,50	135,0 67,5	6,02 3,14	0,2 0,1	0,9 0,2	132,8 66,7	95,7 45,0	116,0 85,1
11	175	C40/50	0,0016 (2 Ø3)	±0,80	171,8 137,5	5,71 5,58	0,25 0,3	0,82 0,8	131,5 123,3	85,2 75,7	136,7 209,8
12	175	C40/50	0,0016 (2 Ø3)	±0,50	147,3 73,7	4,24 4,5	0,25 0,05	0,8 0,4	101,2 53,5	59,83 28,2	113,7 123,6
13	175	C16/20	0,0044 (2 Ø5)	±0,80	110,5 88,4	3,67 4,19	0,2 0,15	0,8 0,7	87,3 75,3	52,2 48,0	97,6 115,5
14	175	C16/20	0,0044 (2 Ø5)	±0,50	106,4 53,2	4,51 4,46	0,12 0,05	1,0 0,4	103,3 58,8	68,17 38,8	104,7 81,3
15	175	C16/20	0,0016 (2 Ø3)	±0,80	110,5 88,4	4,24 5,94	0,15 0,1	0,85 1,0	97,6 131,3	63,5 94,3	100,9 121,7
16	175	C16/20	0,0016 (2 Ø3)	±0,50	77,7 38,9	3,64 2,54	0,15 0,1	1,1 0,4	82,2 49,8	56,0 34,7	79,3 56,3
17	525	C30/35	0,0029 (2 Ø4)	±0,65	61,4 39,9	4,46 4,25	1,0 0,4	0,8 1,2	149,2 134,2	85,0 80,0	170,7 245,0
18	175	C30/35	0,0029 (2 Ø4)	±0,65	167,8 109,1	4,79 4,61	0,75 0,2	0,25 0,45	112,8 101,4	69,0 73,7	124,1 92,8
19	350	C40/50	0,0029 (2 Ø4)	±0,65	90,0 58,5	5,02 5,4	0,25 0,15	1,1 0,6	140 132	91,7 92,3	143,6 145,7
20	350	C16/20	0,0029 (2 Ø4)	±0,65	77,7 50,5	5,04 4,59	0,2 0,25	0,95 1,3	142,1 127,8	90,83 83,3	150 179,7
21	350	C30/35	0,0044 (2 Ø5)	±0,65	73,7 47,9	4,07 7,39	0,2 0,2	0,8 0,5	116,5 188,3	71,33 145,7	128,0 109,8
22	350	C30/35	0,0016 (2 Ø3)	±0,65	53,2 34,6	2,94 2,6	0,15 0,1	1,2 0,4	84,17 61,3	51,67 34,33	92,3 127,7

№ досліду	a/h <sub>0</sub> , мм	C, МПа	ρ <sub>sw</sub> (Ø ВрІ)	η	2F <sub>ult</sub> , кН	f <sub>1</sub> , мм	W <sub>k1</sub> , мм	W <sub>k1</sub> , мм	ε <sub>c1</sub>	ε <sub>s1</sub>	ε <sub>s1</sub>
					η · F <sub>ult</sub> , кН	f <sub>2</sub> , мм	W <sub>k2</sub> , мм	W <sub>k2</sub> , мм	ε <sub>c2</sub>	ε <sub>s2</sub>	ε <sub>s1</sub>
23	350	С30/35	0,0029 (2 Ø4)	±0,80	77,7	5,08	0,6	0,6	141,5	93,0	144,4
					62,2	4,53	0,35	0,8	110,7	69,7	176,3
24	350	С30/35	0,0029 (2 Ø4)	±0,50	77,7	5,08	0,6	0,6	141,5	93,0	144,4
					38,9	2,96	0,1	0,3	83,3	53,3	126,7
25	350	С30/35	0,0029 (2 Ø4)	±0,65	77,7	5,08	0,6	0,6	141,5	93,0	144,4
					50,5	3,88	0,2	0,3	101,2	69,0	124,0

Аналогічна картина спостерігається зі збільшенням кількості поперечної арматури від ρ<sub>w</sub>=0,0016 до ρ<sub>w</sub>=0,0044, яка разом з поздовжньою арматурою після поділу дослідного елемента на окремі блоки та силами зчеплення між ними сприймала зовнішнє поперечне навантаження.

Прикладання малоциклового знакозмінного навантаження, особливо високих рівнів, не тільки зменшувало несучу здатність дослідних зразків до 20 %, а й характер їх руйнування. Якщо при одноразовому навантаженні процес утворення та розвитку тріщин пов'язаний тільки зі зміною напружено-деформованого стану балок, то при дії циклічного знакозмінного навантаження – головним чином зі зменшеннями їх жорсткості, що підтверджується дослідженнями [22, 23, 24, 26].

Очевидно, що основною причиною зниження несучої здатності дослідних зразків при циклічному знакозмінному навантаженні є порушення структури бетону на приопорних ділянках, його розщільнення та часткова втрата зчеплення з арматурою.

Найбільший приріст залишкових деформацій у бетоні й поперечній арматурі спостерігається на перших двох-трьох циклах і, як правило, вони стабілізуються до п'ятого-шостого циклів при рівнях навантаження η=±0,5...±0,65. А в деяких зразках з мінімальним класом бетону і кількістю поперечної арматури при рівнях навантаження η=±0,8 вказані деформації не стабілізувалися і вони руйнувалися на 6...9 циклах від досягнення втомної міцності або можливого зниження їх міцнісних параметрів внаслідок статистичної похибки при визначенні руйнівного навантаження високих рівнів.

Під час випробувань дослідних зразків-балок на дію короткочасного одноразового та циклічного навантаження слідкували за утворенням, розвитком та шириною розкриття тріщин на їхній поверхні. Ширину розкриття нормальних тріщин визначали на рівні розтягнутої робочої арматури, а похилих – посередині висоти балки в місцях, де візуально вона виявлялася найбільшою.

Першими утворювалися нормальні тріщини в зоні чистого згину та під зосередженими силами на рівнях навантаження η=0,15...0,25 від руйнівного. З ростом навантаження ці тріщини розвивалися у бік стиснутої зони, збільшувалася ширина їх розкриття та утворювались нові у зоні сумісної дії згинального моменту і поперечної сили з поступовим їх нахилом до місця прикладення зосередженого навантаження.

Перші похилі тріщини з'явилися при навантаженнях η=0,4...0,6 від руйнівного посередині висоти в балках з малими або середніми прольотами зрізу або розвивалися з нормальних тріщин у зразках з великим прольотом зрізу і максимальною кількістю поперечної арматури.

Процес розвитку нормальних та похилих тріщин відбувався прогнозовано: з ростом внутрішніх зусиль утворювались нові тріщини, збільшувалася довжина і ширина розкриття існуючих тріщин, подальший розвиток вказаних тріщин визначається інтенсивністю поперечного армування в прольотах зрізу. При достатній його кількості руйнування дослідного зразка відбувалося за нормальним перерізом внаслідок, як правило, текучості робочої арматури, при недостатній – раніше утворені похилі тріщини зливалися в одну магістральну, за якою власне, і відбувалося руйнування з текучістю стержнів поперечної арматури з наступним зрізом або роздробленням стиснутої зони бетону.

Після зміни знаку навантаження незалежно від його попереднього рівня нормальні і похилі тріщини утворювалися вже, як правило, при менших на 10...20 % навантаженнях. При цьому,

після зняття навантаження рівнів  $\eta = \pm 0,5 \dots \pm 0,65$  нормальні тріщини закривалися повністю, а похилі – майже повністю. При високих рівнях навантаження ( $\eta = 0,8F_u$ ) відбувався більш стрімкий розвиток існуючих і поява нових похилих та нормальних тріщин, збільшувалася ширина розкриття та зменшувалася відстань між ними. Як правило, незважаючи на симетричне поздовжнє армування зразків, у другому напівциклі (парному «II» або «б») нормальні тріщини є більш довгими і широкими на 10...40 % порівняно з аналогічними тріщинами у першому напівциклі («I» або «а»). Аналогічна картина спостерігається на приопорних ділянках з перехресними похилими тріщинами. Це явище можна пояснити накопиченням зон у бетоні з локальними концентраціями напружень на границях контакту менш деформативних зерен гранітного щебеню з прошарками більш деформативного цементно-піщаного каменю, утворенням непласких мікро- і макротріщин в цих місцях та іншими деструктивними процесами. Очевидно також, що появі тріщин на попередньо стиснутій грані чи зоні балки при зміні знаку навантаження сприяли раніше утворені тріщини на протилежній грані (зоні). Як правило, місце утворення цих тріщин було майже симетричним порівняно з попереднім напівциклом.

З подальшим збільшенням кількості циклів навантаження вказана різниця в довжині та ширині розкриття тріщин нівелюється за виключенням випадків руйнування дослідних елементів на високих ( $\eta = \pm 0,8F_u$ ) рівнях. Уже при перших циклах знакозмінного навантаження відбувалося злиття більшості нормальних наскрізних тріщин і поява аналогічних перехресних похилих тріщин з утворенням окремих блоків (рис. 1), з'єднаних між собою поздовжньою та поперечною арматурою. Взаємне переміщення утворених при циклічному знакозмінному навантаженні блоків одного відносно другого призводить до порушення зчеплення арматури з бетоном і зменшення сил зчеплення по берегах похилих тріщин, внаслідок чого основні внутрішні зусилля на приопорних ділянках сприймаються, в основному, поздовжньою та поперечною арматурою, а в зоні чистого згину і на ділянках під зосередженими силами - розтягнутою (робочою) арматурою, пошкодженою нормальними тріщинами стиснутою зоною бетону і стиснутою арматурою, що виконує роль монтажної на даному напівциклі.

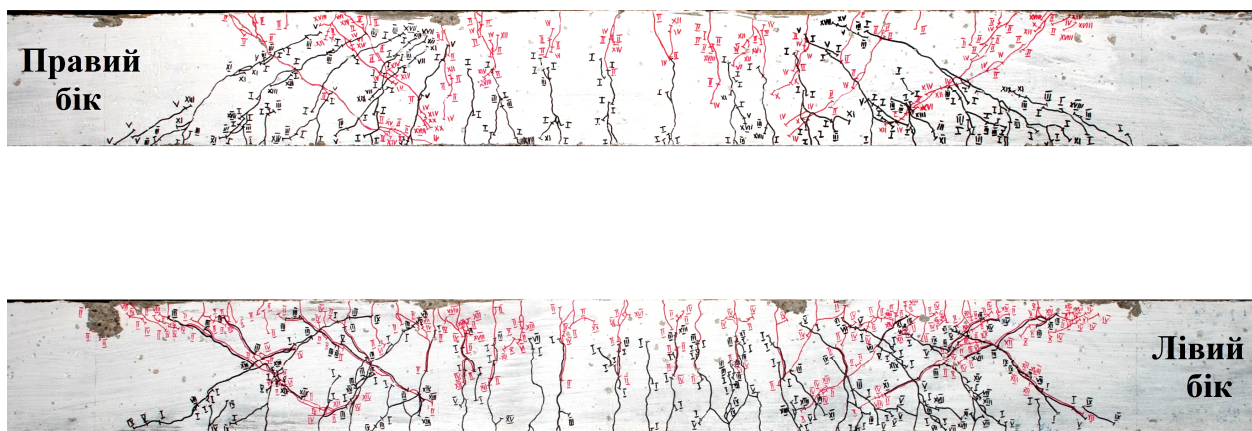


Рисунок 1 – Утворення нормальних і похилих перехресних тріщин на бічних поверхнях балки (серія 2, дослід №17) з поділом її на окремі блоки перед руйнуванням при малоцикловому знакозмінному навантаженні при  $\eta = \pm 0,65F_u$

Аналіз величин стріли прогину дослідних зразків першої серії (т. зв. еталонних балок) при ступінчастому одноразовому навантаженні показав досить малі пропорційні їх прирости до появи перших нормальних і похилих тріщин, які різко зменшують їх жорсткість і, як наслідок, зростання вказаних приростів прогинів хоч і майже пропорційно до високих рівнів ( $\eta = \pm 0,8F_u$ ), проте за більш пологими прямими. З появою значних пластичних деформацій в арматурі та бетоні графіки прогинів викривляються, утворюючи екстремум функції навантаження [7, 10] при руйнуванні балок за нормальними перерізами.

При знакозмінних навантаженнях прогини дослідних зразків-балок у перших напівциклах «а» були більшими від прогинів у перших напівциклах «б» на 5...40 % внаслідок утворення в них залишкових прогинів у перших напівциклах. Але цей процес є затухаючим і до 3...5 циклу вони (прогини) стабілізувалися при низьких і середніх ( $\eta = \pm 0,5 \dots 0,65F_u$ ) рівнях навантаження, а при високих ( $\eta = \pm 0,8 F_u$ ) – до 7...10, якщо раніше не відбувалося їхнього руйнування. При цьому,

прогини балок, що зазнавали циклічних навантажень низьких рівнів не перевищували прогинів еталонних зразків більше, ніж на 10...15%, середніх рівнів - на 15...25 %, високих рівнів – на 15...35 % внаслідок зниження їх жорсткості, що підтверджується дослідженнями [6, 22, 26].

### **Наукова новизна та практична значимість отриманих результатів досліджень**

Виконаними експериментальними дослідженнями частково реалізований системний підхід. За допомогою прийнятої нової методології виконаними експериментальними дослідженнями частково реалізований підхід щодо визначення складного напружено-деформованого стану прогінних залізобетонних елементів, доведених малоцикловим знакозмінним навантаженням високих рівнів до вичерпання несучої здатності, вперше отримані нові дані про вплив на їхню міцність, тріщиностійкість та деформативність конструктивних чинників та факторів зовнішньої дії. Завершення запланованих експериментально-теоретичних досліджень дозволить виявити сповна залежність зазначених параметрів працездатності від вказаних чинників та факторів не тільки зокрема, а й у їхній взаємодії.

Проведені дослідження дозволили розкрити особливості характеру деформування, тріщиноутворення та руйнування дослідних зразків-балок, що зазнають складного напружено-деформованого стану, виявити механізм та нові схеми руйнування цих елементів, а також встановити їх залежність від відповідного співвідношення дослідних факторів.

Результатом досліджень у вказаному напрямку стане запропонований авторами загальний інженерний метод розрахунку міцності похилих і нормальних перерізів залізобетонних конструкцій при малоцикловому знакозмінному і знакопостійному навантаженні високих рівнів, який базуватиметься на виборі найбільш імовірних схем руйнування у залежності від реального співвідношення дослідних факторів, а також розвиток деформаційної моделі розрахунку їх несучої здатності, вдосконалення чинних нормативних документів.

### **Висновки**

Виконаними комплексними експериментальними дослідженнями частково вирішено актуальну науково-технічну задачу по створенню експериментальної бази даних для розробки нових і вдосконалення існуючих розрахункових моделей прогінних залізобетонних конструкцій, що зазнають дії малоциклових знакозмінних навантажень високих рівнів. Серед отриманих результатів та розроблених висновків основними є такі:

- Поставлена і частково розв’язана наукова задача по створенню та дослідженню складного напружено-деформованого стану в залізобетонних балкових елементах під впливом короткочасного знакозмінного малоциклового навантаження. Завдяки прийнятій методології отримані нові експериментальні дані та суттєво уточнені фізичні моделі роботи приопорних та інших ділянок дослідних елементів аж до їх руйнування з урахуванням дії зазначеного навантаження високих рівнів, в результаті чого вперше визначений системний вплив та тріщиностійкість, деформативність та міцність дослідних зразків-балок величини прольоту зрізу  $a/h_0$ , класу бетону  $C$ , коефіцієнта поперечного армування  $\rho_w$ , рівня знакозмінного навантаження  $\eta$ .
- Розкриті особливості напружено-деформованого стану дослідних зразків-балок, що зазнають малоциклового знакозмінного навантаження високих рівнів. Вперше встановлена залежність характеру і виду руйнування їхніх приопорних ділянок від відповідного співвідношення конструктивних чинників та факторів зовнішнього впливу. Систематизовані відомі та виявлені нові схеми руйнування цих елементів при дії вказаного навантаження. Виявлені особливості перерозподілу в них внутрішніх зусиль та деформування внаслідок зменшення жорсткості нормальних і похилих перерізів через порушення структури бетону, його розщільнення та часткової втрати зчеплення з арматурою.
- Встановлено, що малоциклове знакозмінне навантаження, особливо високих рівнів, не тільки зменшує несучу здатність дослідних зразків до 20% та їх тріщиностійкість, суттєво збільшує ширину розкриття нормальних і, особливо, похилих тріщин, величину прогинів до 35%, а й змінює характер їх руйнування порівняно з одноразовим пропорційно зростаючим навантаженням, при якому процес утворення і розвитку тріщин пов’язаний тільки зі зміною їхнього напружено-деформованого стану. Ці відмінності зумовлені, насамперед, отриманими пошкодженнями балок, а також зменшенням їхньої жорсткості.



**Використана література**

1. Залесов А.С. Прочность железобетонных конструкций при действии поперечных сил [Текст] / А.С. Залесов, Ю.А. Климов. – К.: Будівельник, 1989. – 104 с.
2. Залесов А.С. Расчёт прочности железобетонных конструкций при различных силовых воздействиях по новым нормативным документам [Текст] / А.С. Залесов, Т.А. Мухамедиев, Е.А. Чистяков // Бетон и железобетон. – 2002. – №3. – С. 10-13.
3. Давиденко А. И. К расчёту прочности сечений, наклонных к продольной оси элемента, с использованием полной диаграммы деформирования бетона [Текст] / А. И. Давиденко, А. Н. Бамбура, С. Ю. Беляева, Н. В. Присяжнюк // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій. Зб. наук. праць за зег. / ред. Й. Й. Лучка. – Вип. 7. – Львів: Каменяр, 2007. – С. 209-216.
4. Дорошкевич Л. О. Нестандартный метод расчёта поперечной арматуры железобетонных изгибаемых элементов [Текст] / Л. О. Дорошкевич, Б. Г. Демчина, С. Б. Максимович, Б. Ю. Максимович // Проблемы современного бетона и железобетона. Сб. научн. тр. В 2<sup>х</sup> частях. – Часть 1. – Бетонные и железобетонные конструкции. – Минск: НП ООО «Стринко», 2007. – С. 164-177.
5. Бабич Є. М. Робота і розрахунок несучої здатності згинальних залізобетонних елементів таврового профілю при дії повторних навантажень [Текст] / Є. М. Бабич, П. С. Гомон, С. В. Філіпчук. – Рівне. – 2012: В-цтво НУВГП, 2012. – 108 с.
6. Масюк Г.Х. Напружено - деформований стан похилих перерізів згинальних залізобетонних елементів, що зазнають дії малоциклових знакозмінних навантажень [Текст] / Г. Х. Масюк, О. І. Корнійчук // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць. – Рівне: В-цтво НУВГП, 2008. – Вип. 17. – С. 204-211.
7. Митрофанов В. П. Теория идеальной пластичности как элементарная механика псевдопластического предельного состояния бетона: основы, ограничения, практические аспекты, совершенствование [Текст] / В. П. Митрофанов // Коммунальное хозяйство городов. научн. техн. сб. – Киев: Техника, 2006. – Вып. 72. – С. 6-26.
8. Mitrofanov V. P. Optimisation strength theory of reinforced concrete bar elements and structures with practical aspects of its use / Bygnisstatistiske Meddelelser. Vol. 71. No. 4. Dec. 2000. – pp. 73-125. Danish Society for Structural Science and Engineering.
9. Бондаренко В. М. Расчётные модели силового сопротивления железобетона [Текст] / В. М. Бондаренко, В. И. Колчунов. – М.: Изд-во «АСВ», 2004. – 471 с.
10. Павліков А. М. Застосування нелінійної деформаційної моделі в інженерних розрахунках міцності залізобетонних елементів [Текст] / А. М. Павліков, О. В. Бойко // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць. – Рівне: НУВГП, 2012. – Вип. 23. – С. 355-364.
11. Лучко Й. Й. Температурні поля та напружений стан залізобетонних балкових конструкцій мостів [Текст] / Й. Й. Лучко, В. В. Ковальчук // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – Одеса. – 2013. – Вип. № 49. – С. 221-236.
12. Дорофеев В. С. Прочность, трещиностойкость и деформативность неразрезных железобетонных балок [Текст] / В. С. Дорофеев, В. М Карпюк, Е. Н. Крантовская. – Одесса: Эвен, 2010. – 175 с.: ил. – ISBN 978-966-8169-42-7.
13. Дорофеев В. С. Прочность, трещиностойкость, и деформативность предварительно напряжённых тавровых железобетонных элементов [Текст] / В. С. Дорофеев, В. М. Карпюк, Ф. Р. Карпюк. – Одесса: Эвен, 2010. – 223 с.: ил. – ISBN 978-966-8169-43-4.
14. Дорофеев В. С. Прочность, деформативность и трещиностойкость приопроных участков внецентренно растянутых и сжатых железобетонных балок [Текст] / В. С. Дорофеев, В. М. Карпюк, Н. Н. Петров. – Одесса: Эвен, 2011. – 183 с. граф. – ISBN 978-966-8169-49-9.
15. Dorofeev V. Their capacity steel cross-section eccentrically shrink or stretch beams / V. Dorofeev, V. Karpyuk, N. Petrov // Materials of 18 Conference «Theoretical Foundations of Civil Engineering», Polish – Ukrainian-Lithuanian Transactions – Warsaw, September, 2010. – P. 345-352.
16. Карпенко Н. И. О построении более совершенной модели деформирования железобетона с трещинами при плоском напряжённом состоянии [Текст] / Н. И. Карпенко, С. Н. Карпенко // Бетон и железобетон – пути развития (05.09 – 09.09.2005): мат-лы II<sup>й</sup> Всерос. междунаро. конф. по бетону и железобетону. – М., 2005. – С. 431-444.
17. Корсун В. И. Расчёт конструкций на температурные и силовые воздействия с учётом

- неоднородности свойств материалов [Текст]: дис. д-ра техн. наук: 05.23.01 / Корсун Володимир Іванович; Донецька держ. акад. буд-ва та арх-ри. – Макіївка, 2005. – 365 с. – Бібліогр.: С. 326-364.
18. Карпюк В. М. Розрахунок залізобетонного стержня у загальному випадку напружено-деформованого стану [Текст] / В. М. Карпюк, О. М. Петров, М. М. Петров // Комунальне господарство міст. Наук.-техн. зб. Харківської національної академії міського господарства. - Харків: ХНАМГ, 2012. – Вип. 105. Серія: технічні науки та архітектура. – С. 83-99.
  19. Карпюк В. М. Розрахункові моделі прогінних залізобетонних конструкцій при складному напружено - деформованому стані приопорних ділянок [Текст]: дис. д-ра техн. наук: 05.23.01 / Карпюк Василь Михайлович; Одеська держ. ак. буд-ва та арх-ри. – Одеса, 2012. – 365 с. – Бібліогр.: С. 284-326.
  20. Карпюк В. М. Розрахункові моделі силового опору прогінних залізобетонних конструкцій у загальному випадку напруженого стану (монографія) [Текст] / В. М. Карпюк. – Одеса: ОДАБА, 2014. – 352 с. зіл. – ISBN № 978-617-7195-08-4.
  21. Dorofeyev V. Strength calculation of support areas in reinforced concrete beam structures [Текст] / V. Dorofeyev, V. Karpyuk, E. Krantovskaya, N. Petrov // Научно-техн. журнал по стр-ву и арх-ре «Вестник МГСУ». – Москва (Россия): Изд-во МИСИ – МГСУ, 2013. – С. 55-67.
  22. Гомон П. С. Робота згинальних залізобетонних елементів таврового перерізу за дії повторного навантаження [Текст]: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.01 / Гомон Петро Святославович. НУ «Львівська політехніка». – Львів, 2013. – 20 с.
  23. Заречанський О. О. Особливості роботи стиснуто-зігнутих залізобетонних елементів при одноразових і повторних малоциклових навантаженнях [Текст]: атореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.01 / Заречанський Олег Олегович. НУ «Львівська політехніка». – Львів, 2008. – 20 с.
  24. Зінчук М. С. Міцність та деформативність залізобетонних згинальних елементів за малоциклових навантажень в умовах підвищених температур [Текст]: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.01 / Зінчук Микола Степанович. НУ «Львівська політехніка». – Львів, 2008. – 18 с.
  25. Карапетян С. Х. Міцність і стійкість позацикрово стиснутих залізобетонних стержнів в умовах небагаторазово повторних навантажень [Текст]: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.01 / Карапетян Смбаг Хачатурович. ДП НДУБК. – Київ, 2009. – 20 с.
  26. Корнійчук О. І. міцність та тріщиностійкість похилих перерізів згинальних залізобетонних елементів при дії малоциклових знакозмінних навантажень [Текст]: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.01 / Корнійчук Олександр Іванович. Полт НТУ імені Юрія Кондратюка. – Полтава, 2009. – 21 с.
  27. Карпюк В. М. Методика експериментальних досліджень напружено-деформованого стану приопорних участків залізобетонних балок при малоцикловому навантаженні [Текст] / В. М. Карпюк, Е. І. Албу, Ю. А. Сєміна, А. К. Кицак // (28.11.2013) Сб. мат-в V Республ. научно-техн. конф. – Бендери: Бендерский ПФ ГОУ «ПГУ им. Т. Г. Шевченка». – С. 3-10.

**Карпюк Василь Михайлович** – д-р техн. наук, професор, звідувач кафедри опору матеріалів Одеської державної академії будівництва та архітектури.

**Карпюк Василий Михайлович** – д-р техн. наук, професор, заведуючий кафедрою опору матеріалів, Одеської державної академії будівництва та архітектури.

**Karpyuk Vasily** – dr. sciences, professor, head the department of strength materials, Odessa state academy of civil engineering and architecture.