

УДК 624.012.045

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ І
ТРИЩИНОСТІЙКОСТІ У ЗАЛІЗОБЕТОННИХ СКЛАДЕНИХ
КОНСТРУКЦІЯХ**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ И
ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ В ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СОСТАВНЫХ
КОНСТРУКЦИЯХ**

**EXPERIMENTAL STUDY OF STRENGTH AND CRACK RESISTANCE
IN REINFORCED CONCRETE COMPOSITE CONSTRUCTIONS**

Яковенко І. А., к.т.н., (Національний авіаційний університет, м. Київ)

Яковенко И. А., к.т.н., (Национальный авиационный университет, г. Киев)

Yakovenko I.A., Ph.D., (National Aviation University, c. Kiev)

Наведено деякі результати експериментальних досліджень міцності і тріщиностійкості залізобетонних складених конструкцій, які надають можливість перевірки запропонованого розрахункового апарату за опором розтягнутого бетону між тріщинами, ширини розкриття нормальних і похилих тріщин, відстаней між ними.

Приведены некоторые результаты экспериментальных исследований прочности и трещиностойкости железобетонных составных конструкций, которые предоставляют возможность проверки предлагаемого расчетного аппарата по сопротивлению растянутого бетона между трещинами, ширины раскрытия нормальных и наклонных трещин, расстояний между ними.

The results of experimental studies of strength and crack resistance of reinforced concrete composite constructions are given. It's provide the ability to verify the proposed settlement apparatus for resistance of concrete in tension between the cracks, the opening width of normal and inclined cracks, the distances between them.

Ключові слова:

Експеримент, залізобетон, міцність, тріщиностійкість, складені конструкції.
Эксперимент, железобетон, прочность, трещиностойкость, составные конструкции.

Experiment, concrete, strength, crack resistance, composite construction.

Експериментальні дослідження опору розтягнутого бетону, тріщиностійкості і міцності залізобетонних складених конструкцій за похилими перерізами складених позацентрово стиснутих залізобетонних конструкцій проведені лише в одиничних випадках з обмеженою кількістю дослідних параметрів [1, 2].

На сьогоднішній день практично відсутні фактичні дані про взаємні зсуви між бетоном основної конструкції і бетоном посилення – у зонах, прилеглих до шву між бетонами; не досліджено це питання в тих випадках, коли шов розташований у стиснутій або розтягнутій зонах, не виявлено характер впливу на тріщиностійкість залізобетонних складених конструкцій за похилими перерізами при деформаційному навантаженні. Також не виявлено напружено-деформований стан в зонах бетону, прилеглих до шву; не вивчені ефекти, які виникають при цьому (пов'язані з порушенням суцільності залізобетону), не виявлено характер впливу на несучу здатність і тріщиностійкість за нормальними і похилих перерізами; мало дослідних даних про довжину і розвиток тріщин при збільшенні деформаційного навантаження. Проте відмічені параметри є визначальними для аналізу опору залізобетонних складених конструкцій з урахуванням нового ефекту (ефекту порушення суцільності).

Достатньо відзначити, що вплив такого ефекту на рівновагу зусиль у поперечному перерізі за результатами обробки дослідів Немирівського, може становити близько 40%. Такий вплив помітно зростає, коли мова йде про такий диференціальний параметр, як тріщиностійкість.

Такі відомості необхідні, перш за все, з двох причин. З одного боку, це дозволить помітно уточнити залежності для визначення основних параметрів залізобетонних складених конструкцій (зокрема ψ_S , $R_{sup, crc}$ і т. ін.), а з іншого – ця інформація може дати більш повне уявлення про особливості опору залізобетону в цілому.

Програма експериментальних досліджень включала багаторічні експериментальні дослідження позацентрово стиснутих і згинальних залізобетонних складених конструкцій: шести [1], трьох [2] і п'яти [3] серій.

Кількість дослідних конструкцій прийнято з урахуванням варіювання діаметра і кроку хомутів, поздовжнього армування, класу основного і додаткового бетонів та прольоту «зрізу».

Виготовлення складених конструкцій здійснювалося у лабораторії будівельних конструкцій кафедри комп'ютерних технологій будівництва Національного авіаційного університету.

Одночасно з основними залізобетонними складеними конструкціями виготовлялися складені бетонні призми $100 \times 100 \times 400$ – 24 од. і складені армовані призми $100 \times 100 \times 400$ – 48 од.

Опалубка для бетонування основних зразків наведена на рис. 1. Вона включає дерев'яні форми, вкриті бляхою.

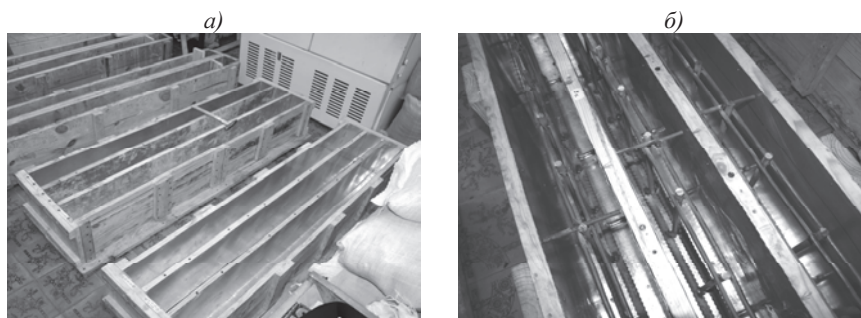


Рис. 1. Опалубні форми: загальний вигляд (а); зі вставленими каркасами (б)

При проведенні експериментальних досліджень тріщиностійкості залізобетонних складених конструкцій за похилими перерізами було встановлено 5 груп тензорезисторів: перша – за висотою поперечного розрахункового перерізу (з обов'язковим встановленням на берегах шву), друга – мембранні розетки на берегах шву; третя – розетки над небезпечною похилою тріщиною; четверта – розетки на складених призмах; п'ята – на бетоні уздовж осі поздовжньої арматури в тому числі і на берегах тріщини.

Основним параметром, за яким велися спостереження в експерименті був опір розтягнутого бетону (з визначенням коефіцієнта Ψ_S), відстані між тріщинами і ширини їхнього розкриття. Вельми інформаційними у цьому відношенні можна розглядати картини тріщин, замальовані під час експерименту на спеціальних планшетах (рис. 2), а також графіки середніх деформацій стиснутого бетону та розтягнутої арматури (рис. 3).

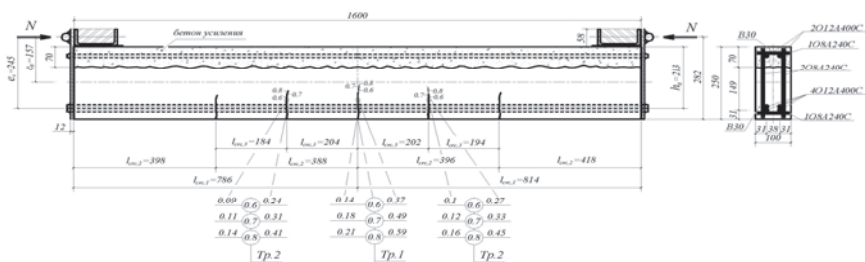


Рис. 2. Схема утворення і розкриття нормальних тріщин для зразка третьої серії ШКС-4А-В30/30 [2]

Експериментально встановлено, що ширина розкриття нормальних тріщин на рівні осі арматури істотно менше, ніж на деякому (2 – 3 діаметра) видаленні від цієї осі. Таким чином арматура стримує розкриття тріщини, протидіючи розкриттю її берегів. Виникаючі при цьому реакції викликають місцевий стиск в бетоні в околиці тріщини у біля арматурної зони – ефект порушення суцільності. Одночасна дія M , N і наявність потужної розтягнутої

арматури призводять до того, що тріщини мають максимальне розкриття не на нижній грані, а в деякій зоні (між нейтральною віссю і віссю розтягнутої арматури) вище осі розтягнутої арматури. Рух тріщини йде за двома напрямками: у бік стиснутої грані бетону та у бік поздовжньої розтягнутої арматури.

Для зразка третьої серії ШКС-4А-В30/30 (розтягнута арматура 4Ø12А400С) мали місце два рівня тріщиноутворення, з відстанню між тріщинами 400мм і 200мм, відповідно. При цьому максимальне розкриття становило 0,14мм і 0,21мм для рівнів навантаження 0,6 і 0,8 від руйнуючого, відповідно.

Що ж до коефіцієнта розтягнутого бетону Ψ_S , його експериментальні значення склали 0,87 і 0,95 для рівнів навантаження 0,6 і 0,8 від руйнуючого, відповідно. Побудовані експериментальні графіки (рис. 4) коефіцієнта Ψ_S , що характеризує опір розтягнутого бетону між тріщинами, в залежності від рівня навантаження.

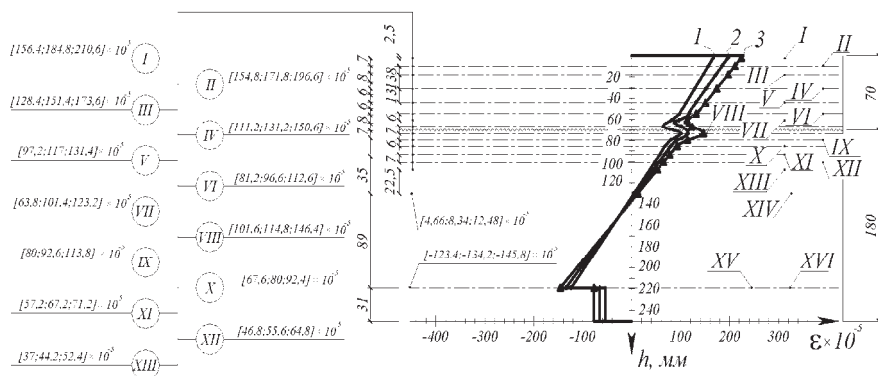


Рис. 3. Графік середніх деформацій бетону та розтягнутої арматури в поперечному перерізі дослідного зразка ШКС-4А-В30/30 для зони між тріщинами, розташованої в середині прольоту; I–XV – осі баз тензорезисторів, розташованих на бетоні, XVI – те ж, на арматурі; 1–3 ступені навантаження у κH : 172,6; 201,4; 230,1, відповідно; у квадратних дужках наведені відносні деформації бетону на ступенях навантаження (κH) 172,6; 201,4; 230,1, відповідно для ступенів 0,6÷0,8 N_u

Отже, у результаті проведених експериментів і результатів їхньої обробки підтверджена багаторівнева схема тріщиноутворення (відповідно до якої тріщини утворюються на всьому діапазоні навантаження, аж до моменту руйнування) і побудовані графіки коефіцієнта Ψ_S , який характеризує опір розтягнутого бетону між тріщинами складеної залізобетонної конструкції у залежності від рівня навантаження. Аналогічні дослідні дані були отримані і для інших двох серій складених дослідних зразків [2].

Аналіз показує, що кількість робочої арматури впливає на коефіцієнт Ψ_S , відстань між тріщинами і ширину розкриття тріщин. Так, із зменшенням кількості робочої арматури з 4Ø12A400C (відсоток армування – 2,17) до 2Ø12A400C (відсоток армування – 1,133), коефіцієнт Ψ_S в експлуатаційній стадії ($0,6N_u$) зменшується у межах 20%; відстань між тріщинами відповідають багаторівневій схемі тріщиноутворення і складають біля 200 мм, що відповідає другому рівню; ширина розкриття тріщин збільшується майже у 1,5 рази.

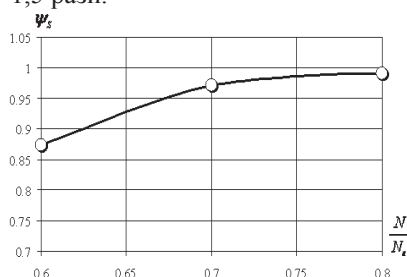


Рис. 4. Експериментальні графіки залежності « $\Psi_S - N / N_u$ » для колони другої серії ПКС–2А–В30/30

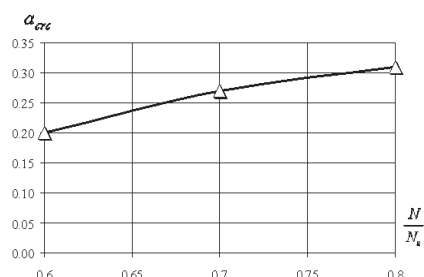


Рис. 5. Експериментальні графіки залежності « $a_{crc} - N / N_u$ » для колони другої серії ПКС–2А–В30/30

Аналіз зміни класу бетону від В20 до В40 показує, що зі збільшенням класу бетону коефіцієнт Ψ_S збільшується на 11%; відстань між тріщинами незначно змінюється, а ширина розкриття тріщин змінюється у межах 13% – 16%.

Вельми важливими є також графіки середніх деформацій бетону та розтягнутої арматури (рис. 3) в поперечному перерізі дослідних зразків, розташованому у середині прольоту в зоні між тріщинами, які побудовані на показах тензорезисторів і механічних приладів з ціною поділки 0,002 мм.

Окрім дослідних даних про деформації бетону та розтягнутої арматури на відповідних рівнях навантаження, ці графіки дають можливість отримати фактичну висоту стиснутої зони і оцінити можливість використання гіпотези плоских перерізів у межах кожного з бетонних шарів (стержнів) для середніх деформацій бетону та арматури (база механічних приладів ($l = 200$ мм) порівняння з відстанню між тріщинами при експлуатаційному рівні навантаження).

Слід зазначити, що проведений аналіз таких графіків дозволяє з упевненістю стверджувати про доцільність використання гіпотези плоских перерізів у межах кожного з бетонних стрижнів (при цьому місцеві обурення деформацій в околиці шва не враховувалися, – проводилася екстраполяція по переважній більшості експериментальних точок) для середніх деформацій

бетону та арматури в зоні між тріщинами у складених поперечних перерізах залізобетонних конструкцій на всьому діапазоні навантаження.

Аналіз показує, що кількість робочої арматури має незначний вплив на середню фактичну висоту стиснутої зони бетону. Так, із зменшенням кількості робочої арматури з $\mu = 2,17\%$ до $\mu = 1,113\%$, висота стиснутої зони бетону зменшується в 1,103 рази. Клас бетону стиснутої зони змінює цей параметр у межах не більше 13 %. Важливим є також отриманий результат про те, що в межах експлуатаційного навантаження (0,6 – 0,8 від руйнуючого), висота стиснутої зони бетону практично не змінюється. При цьому плоскі перерізи перетинаються в одній точці (ніби повертаючись навколо неї).

Безсумнівно, накопичені експериментальні дані [2] будуть вельми корисні для оцінки деформаційного ефекту і для якісної і кількісної оцінки цілого ряду дослідних параметрів, які характеризують опір розтягнутого бетону складених залізобетонних конструкцій в експлуатаційній стадії.

Слід відзначити експериментальні дослідження [3] залізобетонних складених конструкцій при варіюванні прольоту «зрізу», армування, тощо.

Основними параметрами, за якими велися спостереження в експерименті [3] були картини утворення, розкриття і розвитку тріщин при відповідних навантаженнях, характер руйнування і величина руйнівного навантаження, а також значення прогинів на відповідних ступенях навантаження. Вельми інформаційними у цьому відношенні можна розглядати картини тріщин (рис. 6), замальованих під час експерименту на спеціальних планшетах, показання тензорезисторів і мембранних розеток, а також графіки середніх деформації стиснутого бетону та розтягнутої арматури (рис. 3).

Слід зазначити, що для всіх серій на графіках експериментальних залежностей $a_{crc} - \Delta_i / \Delta_u$ ширина розкриття тріщин зростає із збільшенням рівня навантаження незважаючи на те, що зі збільшенням напружень в арматурі відбувається одночасне зменшення відстані між тріщинами (див. рис. 7). При врахуванні багаторівневого процесу утворення тріщин можна було очікувати зменшення ширини розкриття тріщин, так як, незважаючи на збільшення рівня навантаження та зростання напружень в арматурі, відбувається зменшення відстані між тріщинами (зміна відстані між тріщинами відбувається дискретно (обернено пропорційно до зміни згинальних моментів)), що носить протилежний характер впливу на ширину розкриття тріщин. Однак цього не сталося.

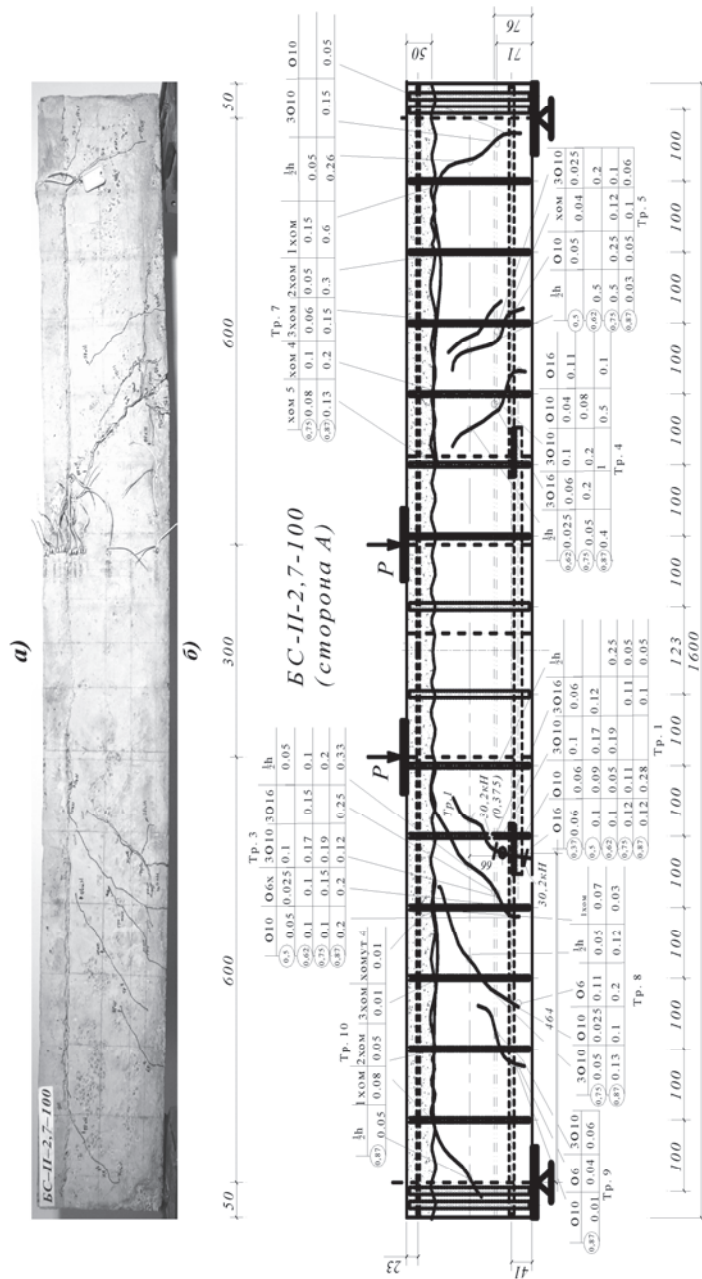


Рис. 6. Схема тріщиноутворення в дослідних конструкціях другої серії (сторона А):
 а) фото залізобетонної складеної конструкції БС-II-2,7-100 після випробування; б) картина виникнення, розвитку і розкриття тріщин на рівні поздовжньої і поперечної робочої арматури; на відстані трьох діаметрів від неї; на рівні 0,5 висоти перерізу і на берегах шва

Отриманий експериментальний результат ставить конкретну вимогу до запропонованої розрахункової методики: розрахунок хоча б якісно повинен підтвердити цю закономірність, помічену в досліді. Дуже важливим є також отриманий результат про те, що в межах експлуатаційного навантаження (0,6–0,8 від руйнівного), висота стиснутої зони бетону практично не змінюється. При цьому плоскі перерізи перетинаються в одній точці (як би повертаючись навколо неї). Результати обробки тензометричних ланцюжків і розеток, встановлених на основні зразки і складені призми дозволили отримати наступні дослідні значення коефіцієнта жорсткості шва ξ : для швів між бетонами В20/В30, $\xi = 1982,2 \text{ кН} / \text{см}^2$; для швів між бетонами В30/В30, $\xi = 2528,5 \text{ кН} / \text{см}^2$.

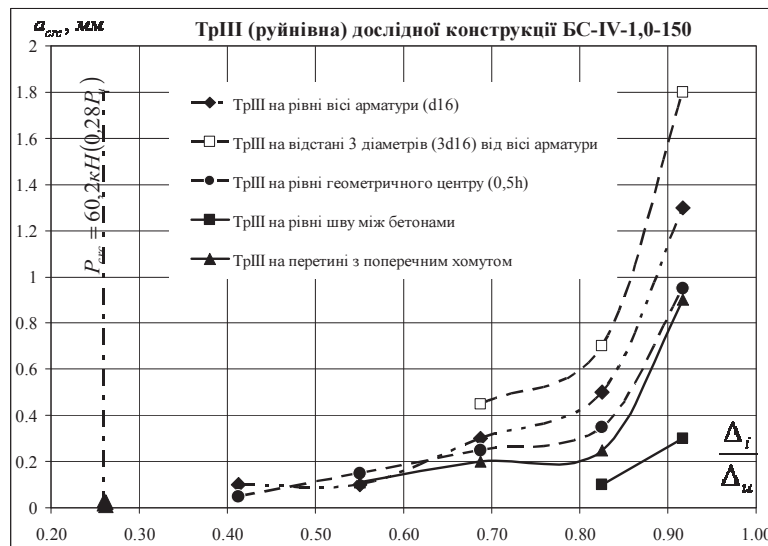


Рис. 7. Графіки залежностей ширини розкриття тріщини TrIII, по якій сталося руйнування (сторона Б) від Δ_f / Δ_u експериментальної конструкції четвертої серії БС-IV-1,0-150 прольотом «зрізу» 1,0

Отримані експериментальні дані наступних параметрів: ширини розкриття тріщин на рівні осі поздовжньої і поперечної розтягнутої арматури і в декількох рівнях над розтягнутою арматурою (a_{crc} вздовж усього профілю тріщини); зміни відстані між тріщинами (l_{crc} функціонального і рівневого) та довжини тріщин по мірі збільшення навантаження (з виявленням багаторівневого процесу утворення тріщин), середніх деформацій поздовжньої і поперечної арматури в тріщині і між тріщинами з урахуванням ефекту порушення суцільності, несумісних деформацій бетону

та арматури, умовного зосередженого зсуву в швах, фібрових деформацій стиснутого бетону, висоти стиснутої зони бетону, при варіюванні різних прольотів «зрізу», діаметра і кроку хомутив.

Характер руйнування дослідної конструкції четвертої серії БО– IV–1,0 – 100 представлений на рис. 8.



Рис. 8. Характер руйнування дослідної конструкції четвертої серії БО – IV – 1,0 – 100

Перед руйнуванням на графіку залежності прогину в дослідній конструкції першої серії БО – I – 1,5 – 150 від навантаження в $\kappa H \times 10^{-1}$ (рис. 9) також має місце стрибок, що характеризує перехід при зміні умов рівноваги.

Руйнування сталося через ступінь після утворення цього стрибка. Таким чином стрибок на графіках (рис. 9) «*навантаження-прогин*» найбільш точно характеризує момент початку руйнування в залізобетонній складеній конструкції при утворенні тріщини у шві між бетонами.

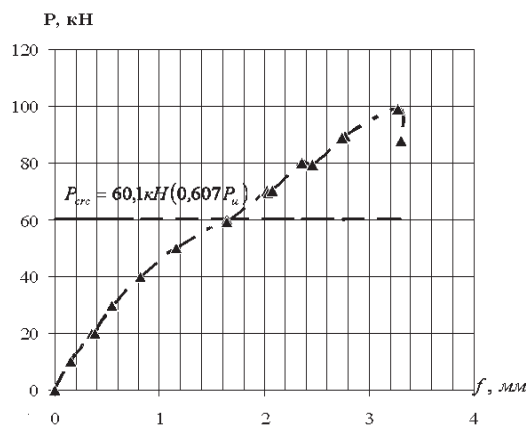


Рис. 9. Графік залежності прогину від навантаження у $\kappa H \times 10^{-1}$ дослідної конструкції першої серії БО – I – 1,5 – 150

Руйнування зразків четвертої серії сталося на XIV ступені. При цьому на характер руйнування вплинули тріщина, яка йде по всій висоті поперечного перерізу. Цей вид руйнування слід виділити в окремий випадок, – руйнування за похилими перерізами від втрати зчеплення в шві між бетонами, яке характерно для великих прольотів «зрізу».

Руйнування зразків першої серії відбулося на XV ступені від зрізу з роздавлюванням бетону над небезпечною похилою тріщиною. При цьому на XIV ступені утворилися тріщини вздовж шву між бетонами. Їх розвиток йшов від торців складеної конструкції, проте до зони руйнування на XV ступені ці тріщини не дійшли.

Таким чином отримані експериментальні дані, які в значній мірі доповнюють накопичений експериментальний матеріал і надають можливість перевірки запропонованого розрахункового апарату за уточненим визначенням ширини розкриття тріщин з урахуванням ефекту порушення суцільності, несумісних деформацій бетону та арматури, умовного зосередженого зсуву в швах між бетонами і їхнього аналізу на різних стадіях навантаження з перевіркою запропонованих розрахункових залежностей з ефективного проектування залізобетонних складених конструкцій.

1. Колчунов В. И. Методика экспериментальных исследований внецентренно сжатых железобетонных конструкций, усиливаемых при реконструкции / В. И. Колчунов, И. А. Яковенко // Будівництво України. – К., 2008. – Вип. 4. – С. 25–28.
2. Яковенко И. А. Методика экспериментальных исследований растянутого бетона между трещинами составных внецентренно сжатых железобетонных конструкций / И. А. Яковенко, Г. К. Биджосян // Будівництво України. – 2011. – Вип. 5. – С. 33–37.
3. Колчунов В. И. Методика экспериментальных исследований железобетонных составных конструкций по наклонным сечениям / В. И. Колчунов, И. А. Яковенко, Н. В. Усенко, А. А. Приймак // Будівельні конструкції : міжвідом. наук.-техн. зб. наук. праць (будівництво) / ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» Міністерства регіонального розвитку та житлово-комунального господарства України. – К., ДП НДІБК, 2013. – Вип. 78: В 2-х кн.. : Книга 1. – С. 422–433.