

УДК 624.012.045

Усенко Н.В.,  
Национальный авиационный университет, г. Киев

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ОБРАЗОВАНИЯ НАКЛОННЫХ ТРЕЩИН В ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СОСТАВНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

*Приведены некоторые результаты экспериментальных исследований образования наклонных трещин в железобетонных составных конструкциях, которые предоставляют возможность проверки предлагаемого расчетного аппарата по образованию наклонных трещин на разных уровнях нагружения*

**Ключевые слова:** железобетонных составных конструкциях, экспериментальные исследования, наклонные трещины.

В процессе экспериментальных исследований решались следующие задачи:

1) разработка методики экспериментальных исследований трещиностойкости железобетонных составных конструкций по наклонным сечениям при деформационном нагружении;

2) проверка предлагаемого расчетного аппарата по уточненному расчету трещиностойкости железобетонных составных конструкций по наклонным сечениям с учетом взаимных смещений арматуры и бетона и эффекта нарушения сплошности;

3) изучение закономерностей напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций составного сечения при деформационном нагружении;

4) экспериментальное определение следующих параметров: значения опорной реакции  $R_{sup,crc}$  в момент образования наклонных трещин в пролете «среза»; фактической высоты сжатой зоны  $x_{fact}$  в сечении I–I (поперечное сечение, проходящее в конце пролета «среза», в зоне действия сосредоточенной силы, по краю опорной пластинки) и высоты сжатого бетона над наклонной трещиной; расстояние по горизонтали  $x$  и по вертикали  $y$  от опорной реакции и от геометрической оси, соответственно; прогибов; ширины раскрытия трещин на уровне оси продольной и поперечной растянутой арматуры вдоль всего профиля трещин; изменения расстояния между трещинами  $l_{crc}$  и длины трещин  $h_{crc}$  по мере увеличения деформационной нагрузки (с проверкой многоуровневого процесса образования трещин); деформаций сжатого бетона по обе стороны от шва и средних деформаций арматуры.

Программа исследований включала испытания пяти серий железобетонных составных конструкций [1]. Количество испытываемых

конструкцій прийнято с учетом варьирования диаметра и шага хомутов, продольного армирования, класса основного и дополнительного бетонов и пролета «среза» см. табл. 1 и рис. 1.

В эксперименте было пять групп электротензорезисторов: первая – по высоте поперечного расчетных сечений (с обязательной установкой на берегах шва); вторая – мембранные розетки на берегах шва; третья – розетки над опасной косою трещиной; четвертая – розетки на составных призмах; пятая – на бетоне вдоль оси продольной арматуры в том числе и на берегах трещины см рис 3.

Таблица 1.

Объем, серии и характеристики основных экспериментальных конструкций\*

| № серии | Шифр конструкции               | $h$ , мм | $b$ , мм | $l$ , мм | Арматура растянутой зоны, диаметр – мм, класс | Арматура сжатой зоны, диаметр – мм, класс | Высота слоя старого бетона, мм | Высота слоя бетона усиления, мм | Класс бетона основного образца | Класс бетона усиления |
|---------|--------------------------------|----------|----------|----------|---|---|--------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|-----------------------|
| 1       | 2                              | 3        | 4        | 5        | 6   | 7   | 8                              | 9                               | 10                             | 11                    |
| I       | БО-I-1,5-100                   | 250      | 100      | 1600     | 2Ø10A400C                                     | 2Ø6A240C                                  | 250                            | –                               | B20                            | –                     |
|         | БС-I-1,5-100                   | 250      | 100      | 1600     | 2Ø10A400C                                     | 2Ø6A240C                                  | 200                            | 50                              | B20                            | B30                   |
|         | БО-I-1,5-150                   | 250      | 100      | 1600     | 2Ø10A400C                                     | 2Ø6A240C                                  | 250                            | –                               | B20                            | –                     |
|         | БС-I-1,5-150                   | 250      | 100      | 1600     | 2Ø10A400C                                     | 2Ø6A240C                                  | 200                            | 50                              | B20                            | B30                   |
|         | БО-I-1,5-100- $l_k$            | 250      | 100      | 1600     | 2Ø10A400C                                     | 2Ø6A240C                                  | 250                            | –                               | B20                            | –                     |
| II      | БС-I-1,5-100- $l_k$            | 250      | 100      | 1600     | 2Ø10A400C                                     | 2Ø6A240C                                  | 200                            | 50                              | B20                            | B30                   |
|         | БО-II-2,7-100                  | 250      | 100      | 1600     | 2Ø10A400C                                     | 2Ø6A240C                                  | 250                            | –                               | B20                            | –                     |
| III     | БС-II-2,7-100                  | 250      | 100      | 1600     | 2Ø10A400C                                     | 2Ø6A240C                                  | 200                            | 50                              | B20                            | B30                   |
|         | БО-III-2,7-100-320             | 250      | 100      | 1600     | 2Ø10A400C                                     | 2Ø6A240C                                  | 250                            | –                               | B20                            | –                     |
|         | БС-III-2,7-100-320             | 250      | 100      | 1600     | 2Ø10A400C                                     | 2Ø6A240C                                  | 200                            | 50                              | B20                            | B30                   |
|         | БС-III-2,7-100-Ø10 (Ø6 A240C)  | 250      | 100      | 1600     | 2Ø10A400C                                     | 2Ø6A240C                                  | 200                            | 50                              | B20                            | B30                   |
| IV      | БС-III-2,7-100-Ø10 (Ø10 A400C) | 250      | 100      | 1600     | 2Ø10A400C                                     | 2Ø6A240C                                  | 200                            | 50                              | B20                            | B30                   |
|         | БО-IV-1,0-100                  | 250      | 100      | 1600     | 2Ø10A400C                                     | 2Ø6A240C                                  | 250                            | –                               | B20                            | –                     |
|         | БС-IV-1,0-100                  | 250      | 100      | 1600     | 2Ø10A400C                                     | 2Ø6A240C                                  | 200                            | 50                              | B20                            | B30                   |
|         | БО-IV-1,0-150                  | 250      | 100      | 1600     | 2Ø10A400C                                     | 2Ø6A240C                                  | 250                            | –                               | B20                            | –                     |
| V       | БС-IV-1,0-150                  | 250      | 100      | 1600     | 2Ø10A400C                                     | 2Ø6A240C                                  | 200                            | 50                              | B20                            | B30                   |
|         | БО-V-2-100                     | 250      | 100      | 1600     | 2Ø10A400C                                     | 2Ø6A240C                                  | 250                            | –                               | B20                            | –                     |
|         | БС-V-2-100                     | 250      | 100      | 1600     | 2Ø10A400C                                     | 2Ø6A240C                                  | 200                            | 50                              | B20                            | B30                   |

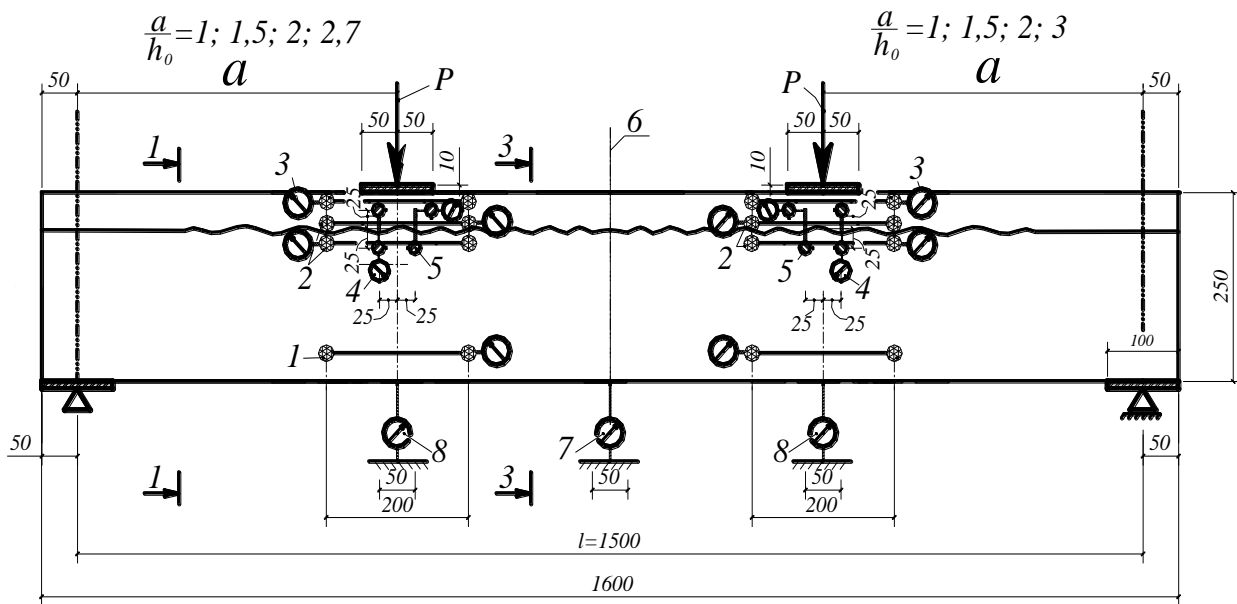
\* *Примечание.* Шифр конструкции включает номер серии, БО или БС – балка обычного или составного сечения соответственно; 1,5; 2,7; 1,0; 2,0 – пролеты среза; 100; 150; 320 – шаг поперечной арматуры; Ø6, Ø10 – диаметры поперечных стержней в шве, в зоне чистого изгиба;  $l_k$  – конструкции с недостаточной анкеровкой; арматура Ø6A240C раскатывается из бухты вручную, а не с помощью валков (чтобы не произошло вытяжки на площадке текучести); после разрушения одного из пролетов среза на него устанавливается стяжка и до разрушения доводится второй пролет среза

Основными параметрами, за которыми велись наблюдения в эксперименте являлись картины образования, раскрытия и развития трещин при соответствующих нагрузках, характер разрушения и величина разрушающей нагрузки, а также значения прогибов и деформаций швов на соответствующих ступенях нагружения.

Весьма информативными в этом отношении можно рассматривать картины трещин (рис. 3), зарисованных во время эксперимента на специальных планшетах, показания электротензорезисторов и мембранных розеток, а также графики средних деформации сжатого бетона и растянутой арматуры.

Для опытной конструкции пятой серии БС-V-2-100 трещины образовались в зоне нейтральной оси и развивались как в направлении к верхней грани, так и в направлении к продольной растянутой арматуре.





б)



Рис. 2. Схема расположения механических приборов (а) и общий вид их установки на железобетонные составные конструкции (б):

1 – механические приборы, расположенные на оси арматуры с помощью специальных приваренных гаек с одетыми на них резиновыми шлангами; 2 – механические приборы, расположенные на берегах шва; 3 – механические приборы, расположенные на сжатой фибре бетона; 4, 5 – механические приборы, расположенные на берегах шва для измерения его вертикальных и горизонтальных смещений; б – ось симметрии опытной конструкции; 7, 8 – прогибомеры, расположенные в середине опытной конструкции и по линиям действия сил, соответственно





**б)** БС-V-1,5-100 (сторона Б)

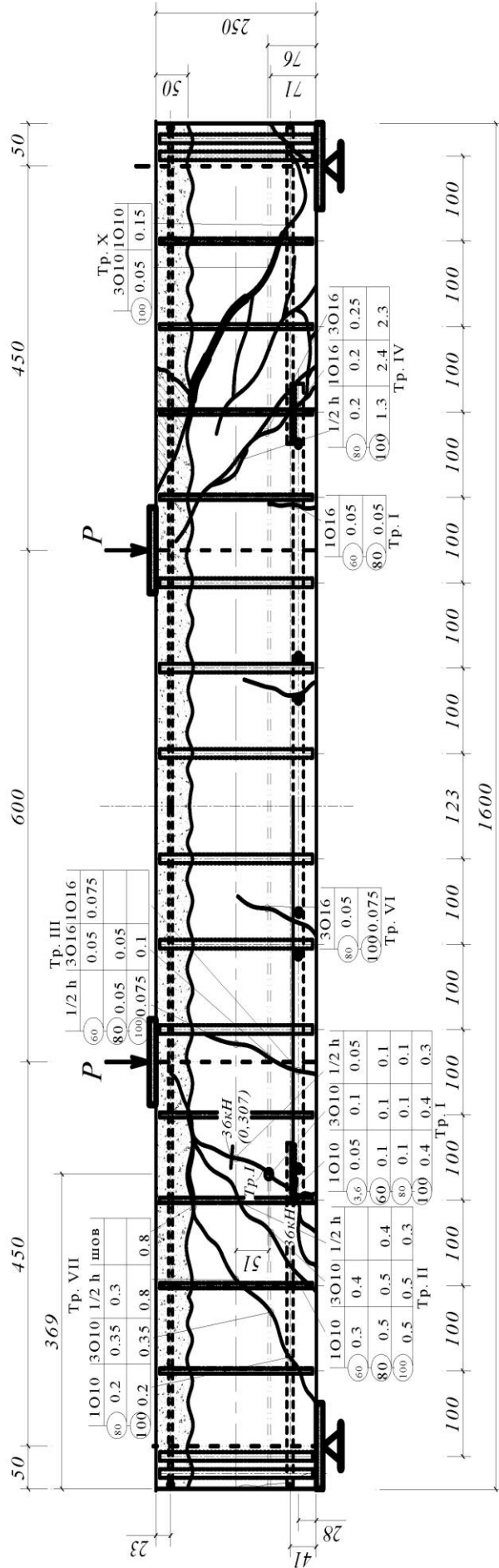


Рис. 3. Схема трещинообразования в опытных конструкциях пятой серии (сторона Б): а) фото железобетонной составной конструкции БС-V-2-100 после испытания; б) картина образования, развития и раскрытия трещин на уровне продольной и поперечной рабочей арматуры, на удалении трех диаметров от нее; на уровне 0,5 высоты сечения и на берегах шва в той же конструкции

Выявлено, что в железобетонных составных конструкциях, в месте шва между бетонами происходят возмущения деформаций (рис. 6), которые представляется возможным заменить условным сосредоточенным сдвигом при экстраполяции гипотезы плоских деформаций каждого слоя в местных зонах, прилегающих к шву.

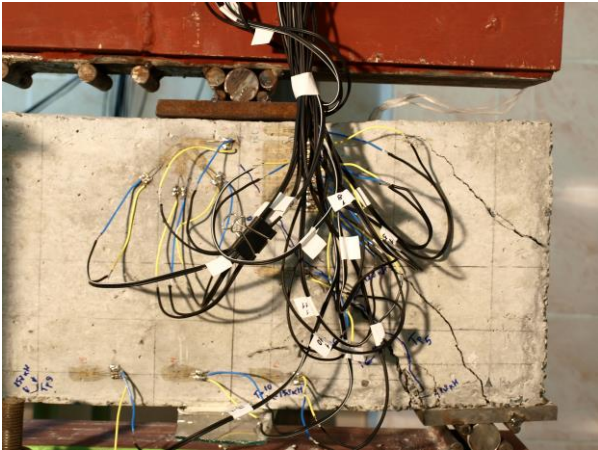


Рис. 4. Общий вид электро-тензометрических измерений при проведении экспериментальных исследований



Рис. 5. Выявление образования и измерение ширины раскрытия трещин с помощью микроскопа МПБ-2 с 24-х кратным увеличением

Следует отметить, что проведенный анализ таких графиков позволяет с уверенностью утверждать о целесообразности использования гипотезы плоских сечений в пределах каждого из составляющих стержней для средних деформаций бетона и арматуры в железобетонных составных конструкциях на всем диапазоне нагружения.

**Основные результаты проведенных экспериментальных исследований сводятся к следующему:**

– проведены экспериментальные исследования и получены новые экспериментальные данные железобетонных составных конструкций для следующих основных параметров: момента образования наклонных трещин, ширины раскрытия трещин на уровне оси продольной растянутой арматуры и вдоль всего профиля трещины; изменения расстояния между трещинами  $l_{crc}$  и длины трещин  $h_{crc}$  по мере увеличения нагрузки, деформаций рабочей арматуры и бетона вдоль оси рабочей арматуры между трещинами, которые в значительной мере дополняют накопленный экспериментальный материал.

При этом подтверждено, что арматура сдерживает раскрытие трещины, противодействуя раскрытию ее берегов и возникающие при этом реакции вызывают местное сжатие в бетоне в окрестности трещины – эффект

нарушения сплошности, что и приводит к изменению профиля трещины от треугольного к сложному;

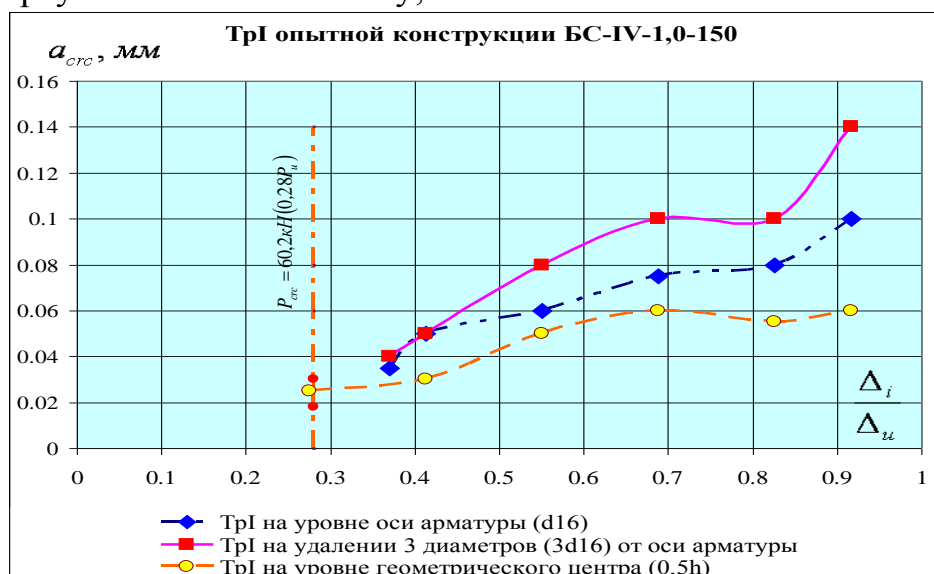


Рис. 6. Графики зависимостей ширины раскрытия первой образовавшейся трещины ТрI (сторона Б) от  $\Delta_i / \Delta_u$  экспериментальной конструкции четвертой серии БС-IV-1,0-150 пролетом «среза» 1,0

– выполненный анализ экспериментальных картин образования и развития трещин, позволяет выявить несколько уровней появления трещин. Причем трещины последующего уровня появляются, как правило, в середине расстояния между трещинами предыдущего уровня (в проведенном эксперименте наблюдалось два-три уровня трещинообразования).

Одновременное действие  $M$  и  $Q$  и наличие мощной растянутой арматуры приводят к тому, что трещины имеют максимальное раскрытие на нижней грани, а в некоторой зоне (между нейтральной осью и осью растянутой арматуры) выше оси растянутой арматуры. Движение трещины идет по двум направлениям: в сторону сжатой грани бетона и в сторону продольной растянутой арматуры. Трещины, образующиеся в приопорной зоне в середине столба образующейся арки могут выходить на верхнюю грань железобетонной конструкции практически в любую точку (необязательно совпадающую с точкой приложения силы) при пролетах «среза» больше двух;

– экспериментально подтверждена правомерность использования гипотезы плоских сечений для средних деформаций рабочей арматуры и сжатого бетона в каждом из составляющих стержней бетона, и получена возможность экспериментального определения высоты сжатой зоны бетона в железобетонных составных стержнях. В пределах эксплуатационной нагрузки (0,6 – 0,8 от разрушающей), высота фактической сжатой зоны бетона практически не изменяется (сжатая зона бетона приостанавливает их развитие на столько, что увеличение их высоты происходит лишь на несколько миллиметров на последующих ступенях нагружения);

– для всех серий на графиках экспериментальных зависимостей  $a_{crc} - \Delta_i / \Delta_u$  ширина раскрытия трещин возрастает с увеличением уровня

нагружения, несмотря на то, что происходит одновременное уменьшение уровневого расстояния между трещинами, оказывающего противоположное влияние на ширину раскрытия трещин. Полученный экспериментальный результат ставит весьма конкретное требование к предлагаемой расчетной методике: расчет хотя бы качественно должен подтвердить эту закономерность, замеченную в опыте;

– в железобетонных составных конструкциях, в месте шва между бетонами происходят возмущения деформаций, которые представляется возможным заменить условным сосредоточенным сдвигом при экстраполяции гипотезы плоских деформаций каждого слоя в местных зонах, прилегающих к шву;

– полученные экспериментальные данные предоставляют возможность проверки предлагаемого расчетного аппарата образования наклонных трещин на разных уровнях всех трех типов и основных рабочих гипотез с учетом условных сосредоточенных сдвигов в шве между бетонами, несовместности деформаций бетона и арматуры и эффекта нарушения сплошности бетона для эффективного проектирования железобетонных составных конструкций, при варьировании разных классов бетона и армирования.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.

### Анотація

Представлені деякі результати експериментальних досліджень виникнення похилих тріщин у залізобетонних складених конструкціях, які надають можливість перевірки запропонованого розрахункового апарату за виникненням похилих тріщин на різних рівнях навантаження.

**Ключові слова:** залізобетонні складені конструкції, експериментальні дослідження, похилі тріщини.

### Abstract

It is given the results of experimental studies of the formation inclined cracks in concrete composite constructions, which provide the ability to verify the proposed settlement of the education unit inclined cracks at different levels of loading.

**Keywords:** concrete composite constructions, experimental studies, inclined cracks.