

В.И. КОЛЧУНОВ¹, А.И. ДЕМЬЯНОВ¹, М.М. МИХАЙЛОВ¹

¹Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Россия

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С КРЕСТООБРАЗНОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ТРЕЩИНОЙ ПРИ КРУЧЕНИИ С ИЗГИБОМ

Аннотация. В статье предложена методика и программа экспериментальных исследований железобетонных конструкций прямоугольного сечения с крестообразной пространственной трещиной при кручении с изгибом, основной целью которой является проверка расчетных предпосылок и экспериментального определения расчетных параметров предлагаемой методики расчета. Проведенные экспериментальные исследования представляют возможность проверки предлагаемого расчетного аппарата и уточнения закономерностей для определения прогибов, углов поворота крайних сечений, напряжений в сжатой зоне бетона. Для анализа в статье приведены типичная для эксперимента схема образования и развития трещин в виде развертки, а также характерные графики зависимости углов поворота.

Ключевые слова: железобетонные конструкции, кручение с изгибом, деформирование, экспериментальная установка, углы поворота, прогибы, раскрытие пространственных крестообразных трещин, экспериментальная проверка расчетной модели, углы поворота.

V.I. KOLCHUNOV¹, A.I. DEMYANOV¹, M.M. MIHAILOV¹

¹South-Western State University, Kursk, Russia

EXPERIMENTAL STUDIES OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES WITH CROSS-SHAPED SPATIAL CRACK UNDER TORSION WITH BENDING

Abstract. The article offers a method and program for experimental studies of reinforced concrete structures with cross-shaped spatial crack under torsion with bending, the main purpose of which is to check the design assumptions and experimental determination of the design parameters of the proposed calculation method.

The conducted experimental studies provide an opportunity to test the proposed calculation apparatus and clarify the regularities for determining deflections, angles of rotation of extreme sections, and stresses in the compressed zone of concrete. For analysis, the article presents a typical experimental scheme for the formation and development of cracks in the form of a sweep, as well as characteristic graphs of the dependence of the angles of rotation of end sections.

Keywords: reinforced concrete structures, torsion with bending, deformation, experimental installation, angles of rotation, deflections, opening of cross-shaped spatial cracks, experimental verification of the design model, angles of rotation.

Введение

В настоящее время все больше внимания уделяется изучению работы железобетонных элементов, находящихся в сложном напряженно-деформированном состоянии, так как эта область работы железобетона наименее изучена. Также следует отметить, что задача совместного действия изгиба и кручения железобетона привлекает повышенное внимание в связи с тем, что в практике проектирования строительных конструкций (благодаря использованию современных расчетных комплексов) широко применяются расчеты с учетом

пространственной работы конструкций. В действующих нормативных документах отсутствуют разработанные способы расчета деформаций после образования трещин и ширины раскрытия трещин элементов, работающих при изгибе с кручением. Таким образом, представляется актуальным проведение научно-исследовательских работ, направленных на получение необходимых теоретических и экспериментальных данных для построения расчетного аппарата железобетонных конструкций прямоугольного сечения при бетоне и арматуры, а также различной статической схемы нагружения, с учетом влияния важнейших расчетных параметров, наиболее полно отражающего особенности действительного сопротивления железобетона при кручении с изгибом.

Результаты исследования и их анализ

Исследованием поведения железобетонных элементов прямоугольного поперечного сечения при кручении и изгибе с кручением занимались многие исследователи. У нас в стране изгибу с кручением посвящены работы последних лет В.М. Бондаренко, П.Ф. Вахненко, Г. Гезунда, Н.И. Карпенко, В.И. Колчунова, А. М. Кузьменко, О.Н. Печеника, В.С. Плевкова, С.В. Поветкина, В.И. Травуша, В.В. Тура, Л.В. Фалеева, и др. [1-16] и за рубежом подобные исследования проводились А. Бишара, Х. Гангарао, П. Зиа, П. Мухержи, Г. Коуэн, Т. Хсу, Р. Эвансом и др. [17-20]. Большинство специалистов занималось изучением вопросов прочности указанных элементов. Вопросы деформативности железобетонных элементов при действии изгибающего и крутящего моментов изучали лишь отдельные авторы, а целенаправленных экспериментальных исследований деформации и жесткостных параметров железобетонных стержней при одновременном действии изгибающего и крутящего моментов, поперечной силы сплошного и полого прямоугольного сечения проводилось достаточно мало. При этом большинство авторов предлагали зависимости для вычисления углов закручивания лишь для состояния железобетонных стержневых элементов до образования трещин, а вопросами определения прогибов и ширины раскрытия трещин при указанных силовых воздействиях для балок прямоугольного сплошного и полого поперечного сечения после образования трещин практически никто не занимался.

В современной теории железобетона накоплено сравнительно мало фактических данных о поведении железобетонных конструкций прямоугольного сечения и их напряженно-деформированном состоянии, в весьма малой степени изучены эффекты, связанные с нарушением сплошности железобетона [13–16]. Кручение с изгибом железобетонных конструкций остается одной из наименее изученных областей, как в теоретическом плане, так и в плане экспериментального подтверждения имеющихся [8, 9] и разрабатываемых [4,10,12,14] расчетных моделей. Из этого следует, что при разработке методики и программы экспериментальных исследований особое внимание следует уделять возможности экспериментальной проверки параметров, входящих в предлагаемую расчетную модель, в частности – определение углов поворота и прогибов расчетных сечений, схем образования, развития и раскрытия трещин, а также деформирования арматуры и бетона в сложно напряженных областях исследуемых железобетонных конструкций. В процессе проведения экспериментов требуется фиксировать образование, развитие и раскрытие трещин на специальных планшетах с помощью миллиметровой бумаги и карандашной кальки в масштабе один к одному. Значительную пользу приносит ведение журнала экспериментальных наблюдений, в котором фиксируются основные особенности наблюдаемого процесса, происходящего при сопротивлении испытываемой экспериментальной конструкции. Данные, которые были получены в ходе проведения экспериментальных исследований войдут в банк опытных данных и смогут дать более полное представление об особенностях сопротивления железобетона в целом.

Основной целью проведения экспериментальных исследований является проверка предложенной расчетной модели и лежащих в основе нее рабочих предпосылок, а также

выявление закономерностей деформирования, появления, развития и раскрытия трещин железобетонных конструкций прямоугольного сечения в сложном напряженно-деформированном состоянии при совместном действии кручения с изгибом.

Проверка построенной расчетной модели и заложенных в ее основу рабочих гипотез, в перспективе могут поспособствовать увеличению эффективности проектирования железобетонных конструкций.

Задачи, решавшиеся при подготовке и проведении экспериментальных исследований железобетонных конструкций на кручение с изгибом:

1) Обзор и анализ существующих расчетных предложений и проведенных экспериментальных исследований.

2) Разработка и дальнейшее усовершенствование методики проведения экспериментальных исследований железобетонных конструкций прямоугольного сечения при кручении с изгибом, а также анализ их результатов.

3) Экспериментальная проверка лежащих в основе разработанной расчетной модели положений и рабочих гипотез.

4) Сопоставительный анализ закономерностей опытного деформирования железобетонных конструкций при кручении с изгибом и результатов расчета по предложенной модели.

Конструкции опытных образцов. Программа проведения эксперимента предусматривает испытание конструкций балочного типа. Характеристики конструкций приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Объем и характеристики основных экспериментальных конструкций*

Тип конструкции	Кол-во испыт.	Расстояние между "ключами", мм	h, мм	b, мм	L, мм	Арматура растянутой зоны, диаметр – мм, класс	Арматура сжатой зоны, диаметр – мм, класс	Класс бетона
I	2	600	200	100	1200	2∅ 10A240C	2∅ 10A240C	B25
	2	400						
	2	200						

*Примечание. Арматура поперечных хомутов ∅ 6A240C раскатывается из бухты вручную, а не с помощью валков (чтобы не произошло вытяжки на площадке текучести).

Изготовление балок осуществлялось в лаборатории строительных конструкций кафедры уникальных зданий и сооружений Юго-западного государственного университета по чертежам (см. рисунок 1) из бетона – B25.

При этом использовался щебень крупностью 5-10 мм. Фракции просеивались в лаборатории строительных материалов перед бетонировкой строго по ситам. Рабочее армирование выполнено из стержневой арматуры ∅ 10-A240C по ГОСТ 5781-82, с хомутами из арматуры ∅ 6-A240C по ГОСТ 5781-82.

Значения характеристик арматуры были определены в соответствии с действующими стандартами. При этом было испытано по пять стержней длиной 400 мм каждого диаметра (∅6A240C, ∅10A240C). С целью определения характеристик прочности и деформативности бетона одновременно с бетонировкой основных опытных конструкций изготавливались вспомогательные бетонные образцы из бетонов того же состава: бетонные кубы сечением 100×100×100 в соответствии с ГОСТ 10180–2012 с целью определения прочностных характеристик бетона на 28-е и 56-е сутки.

При этом фактическая прочность кубов бетона на сжатие составила: на 28-е сутки – 24.51 МПа; на 56-е сутки (перед началом испытаний опытных конструкций) – 26.15 МПа. Перед проведением бетонировок расчетные составы были проверены и скорректированы.

а)

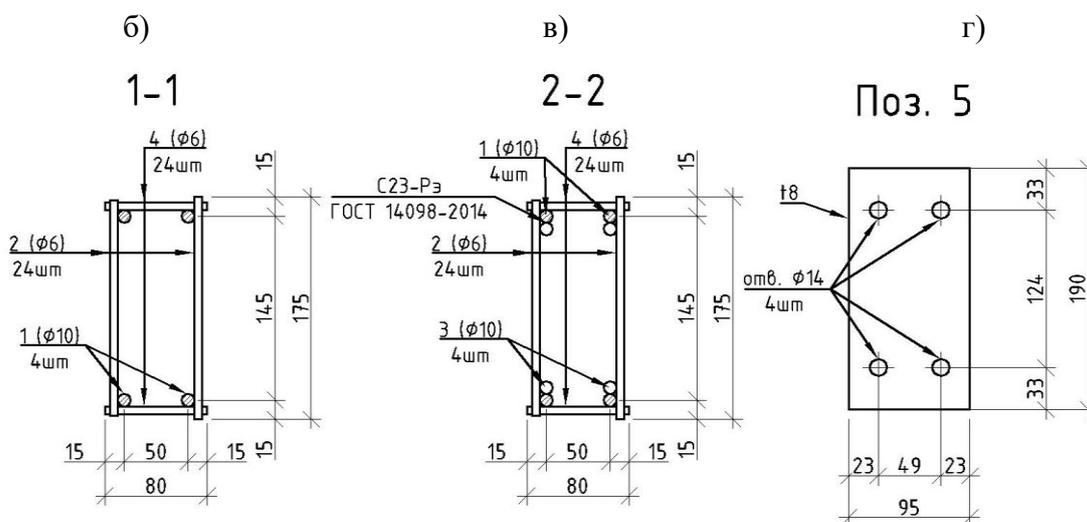
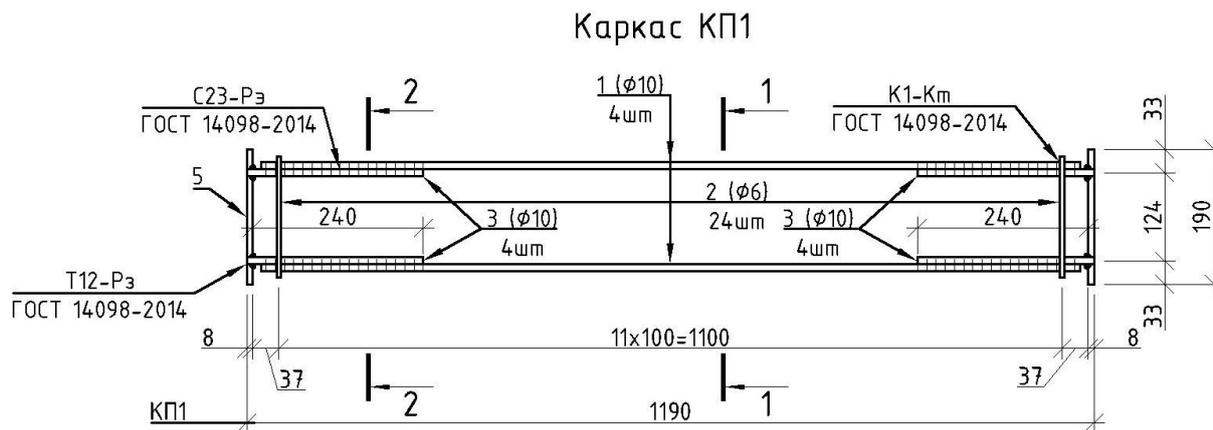


Рисунок 1 – Чертежи экспериментальных конструкций (а), а также их сечений 1-1 – (б); 2-2 – (в); вид с торца балки – (г)

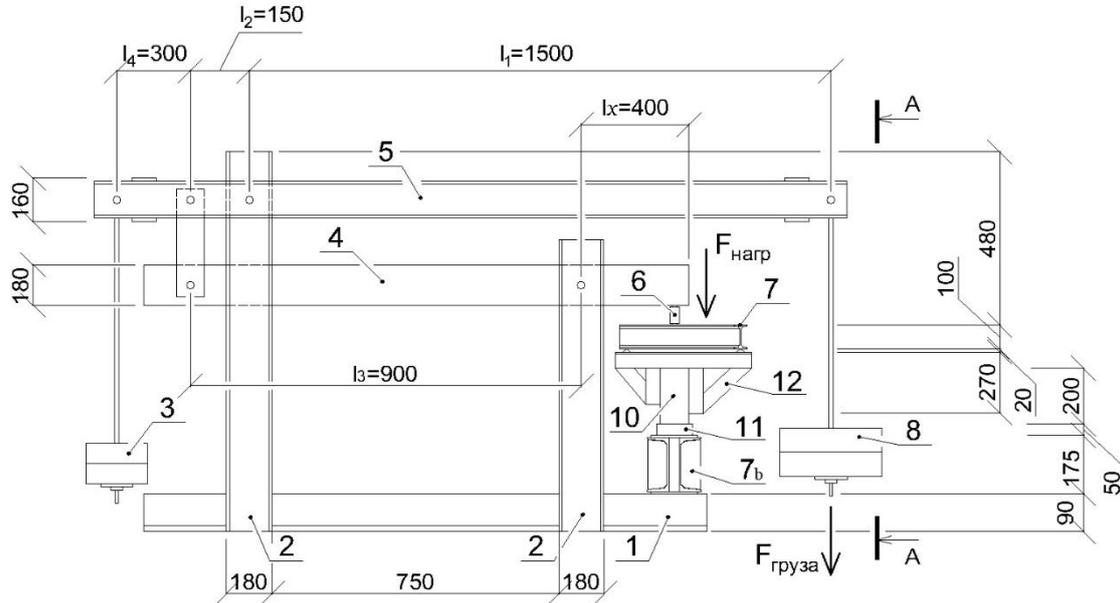
Методика проведения эксперимента

Исследование работы железобетонных конструкций при кручении с изгибом и разработка модели их деформирования невозможны без достоверных экспериментальных данных. С целью их получения на кафедре уникальных зданий и сооружений Юго-западного государственного университета была создана экспериментальная установка (подробности [6] и рисунок 2). Она состоит из каркаса, закрепленной на нем системы рычагов, опорной площадки, траверсы и ножей для передачи нагрузки, а также подвесной площадки для нагружения. При этой схеме испытаний нагрузка на образцы передавалась через специальные ключи, надевавшиеся непосредственно на образец (рисунок 2 и рисунок 3).

Учитывая, что исследования такого дифференциального параметра как ширина раскрытия трещин проводятся, в том числе и с позиции механики разрушения, то это находит отражение в методике проведения эксперимента. Экспериментальная установка дает возможность реализовывать намеченную схему нагружения (рисунок 2). В перечень измерительной аппаратуры, используемой при проведении исследований, входят: индикаторы часового типа цифровые SYLVAC S_Dial WORK (BASIC) с ценой деления 0,001 мм и ходом штока 50 мм, тензометрическая станция АИД-4 с релейным переключателем на 120 каналов и комплектом тензорезисторов (базой 20 мм), динамометр ДОСМ-3-3, микроскоп МПБ-3М. Электротензорезисторы устанавливаются на фибровых волокнах и в сжатой зоне бетона, расположенной под концом опасной пространственной трещины. Целью установки электротензорезисторов является определение фибровых и главных деформаций в

сжатой зоне бетона, прилегающей к концу опасной пространственной трещины (в окрестности расчетного сечения). При подготовке методики экспериментальных исследований предусматривалась установка продублированных групп электротензорезисторов, представляющих собой розетки, образованные четырьмя датчиками под углом 45° , наклеенные на бетон с использованием клея «Диакрин».

а)



б)

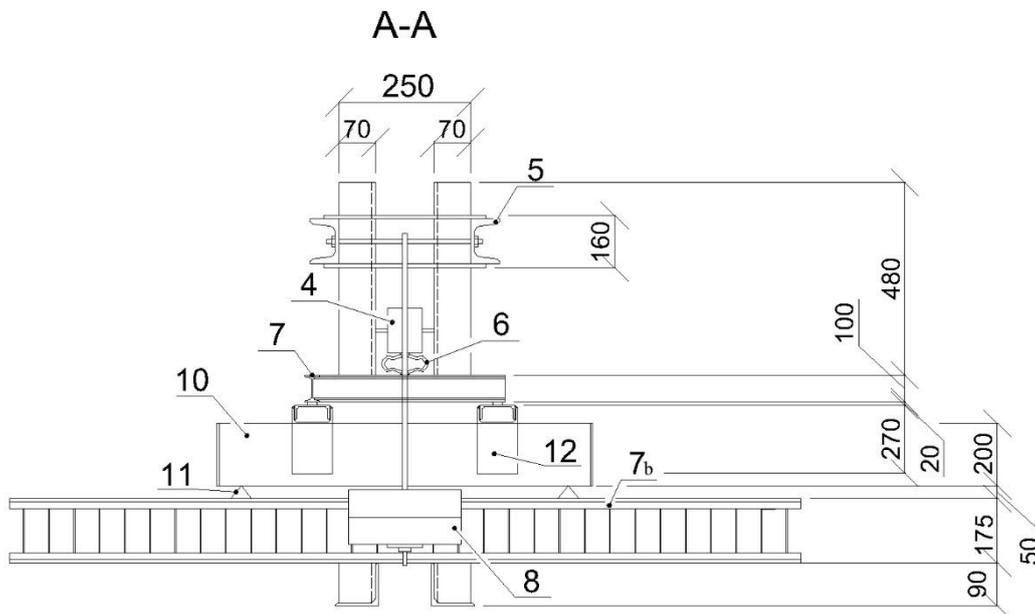


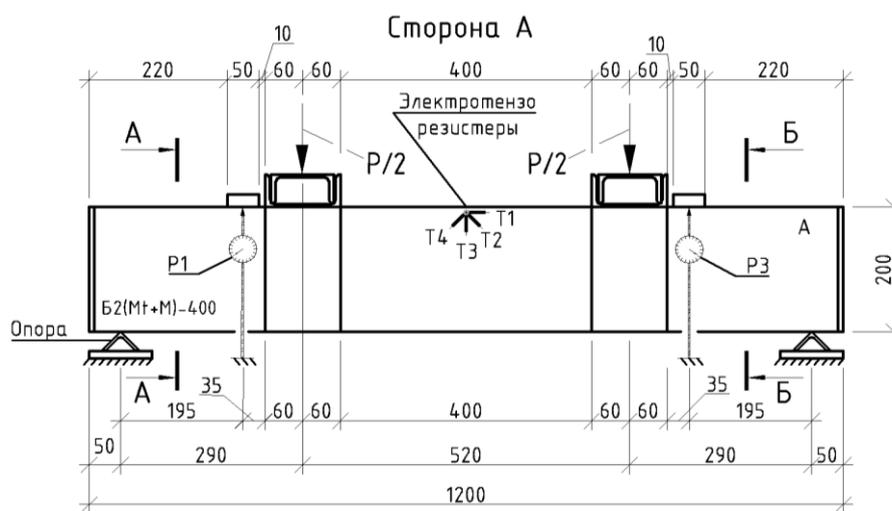
Рисунок 2 – Схема установки гравитационного рычажного типа с 22-х кратным увеличением нагрузки от соотношения плеч для проведения испытаний на изгиб при кручении

1 - основание установки; 2 - стойки; 3 - контргруз; 4, 5 - рычаги; 6- силовой динамометр; 7 - траверса; 7_b – траверса основная; 8 - рабочие грузы; 9 - плечи для создания кручения; 10 - испытываемый образец; 11 - опорная площадка; 12 – "ключи"

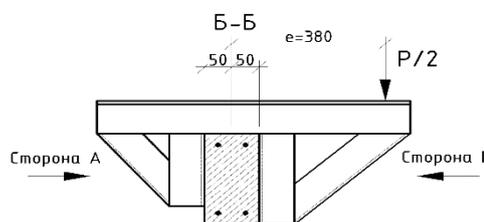
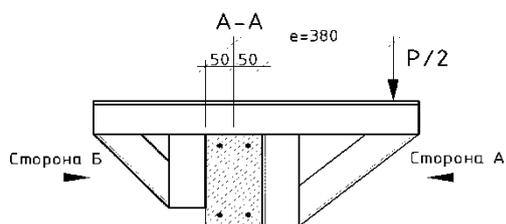
а)



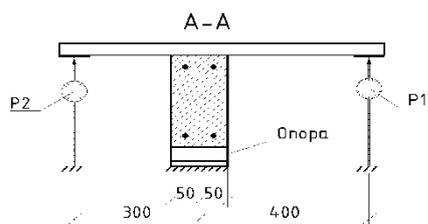
б)



г)



д)



е)

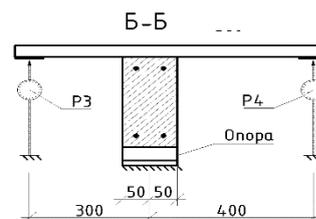
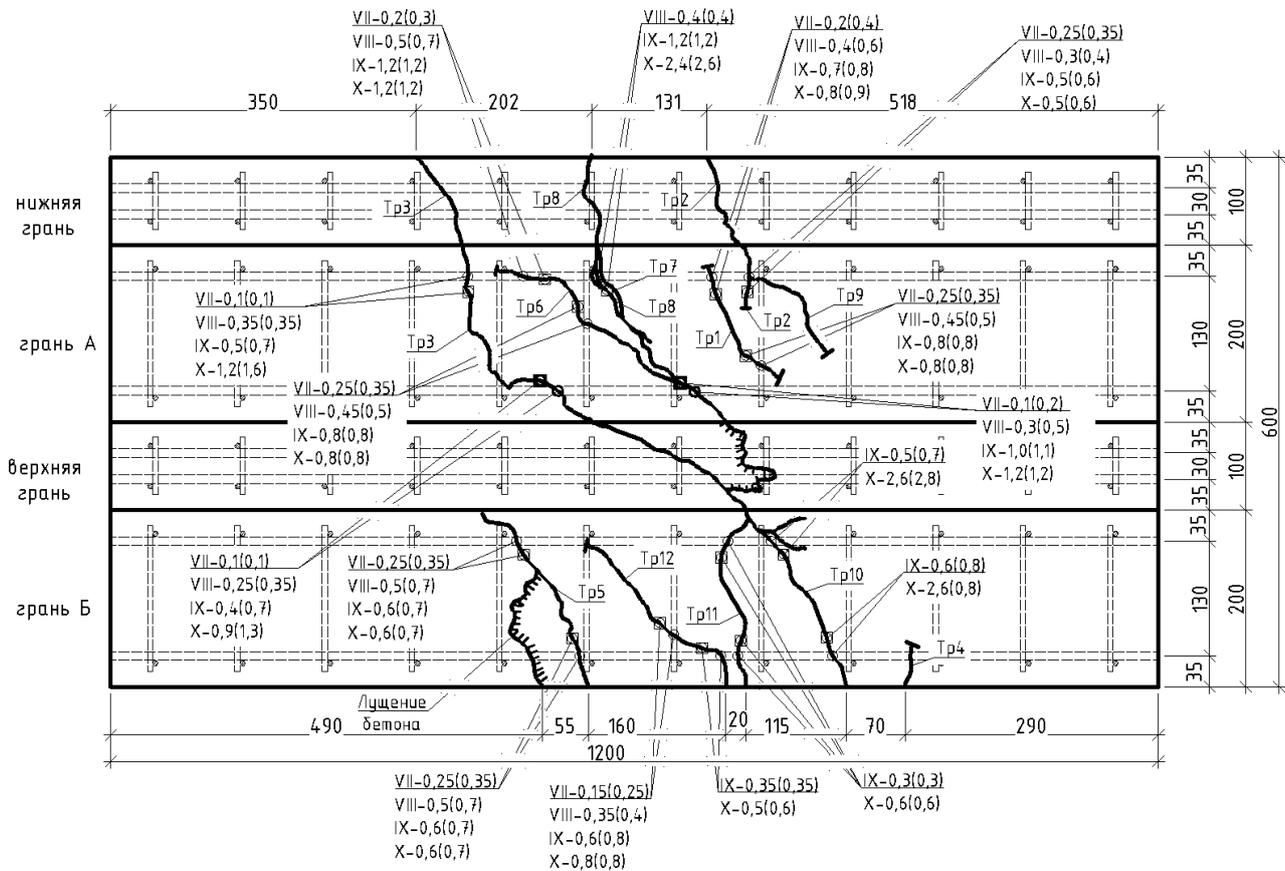


Рисунок 3 – Общий вид испытаний (а), статическая схема (б) приложенных нагрузок (б), (в), (г) и размещения измерительных приборов (б), (д), (е)

При проведении испытаний нагружение выполняется гравитационным способом, с использованием предварительно взвешенных грузов. Взвешивание грузов производится на весах рычажного типа с ценой деления 5 грамм. Схема приложения нагрузок и размещения измерительной аппаратуры показаны на рисунках 3-5. На рисунке 3 имеем прогибомеры **P1 - P4** – индикаторы часового типа для измерения перемещений испытываемой конструкции, а также установленных “ключей” от рычага. Картина образования и развития трещин при проведении испытаний железобетонных конструкций Б2-ПР-400 на кручение с изгибом (рисунок 4, - ширина раскрытия и развертки трещин), а также их графиков прогибов и поворотов углов (рисунок 5, - сторона А). Графики зависимости деформаций бетона розетки от нагрузки: **T1–T4** – розетка из 4-х тензорезисторов под углом 45° друг к другу, наклеенных на бетон с передней стороны конструкции рисунок 6 (сторона А); **T5–T8** – розетка из 4-х тензорезисторов под углом 45° друг к другу, наклеенных на бетон.

а)



б)



в)

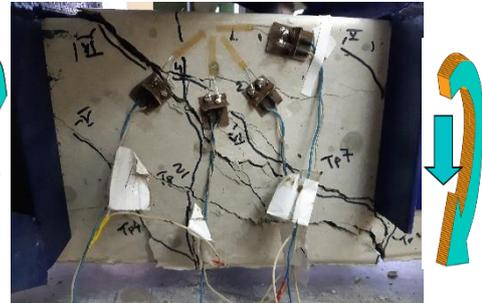


Рисунок 4 – Картина образования и развития трещин при проведении испытаний железобетонных конструкций Б2-ПР-400 на кручение с изгибом: а- развертка; б – сторона Б; в – сторона А

Перед началом экспериментальных исследований испытываемые конструкции тщательно осматривались на предмет наличия сколов, деформаций и начальных трещин. Каждый образец в ходе эксперимента доводился до разрушения, с целью получения максимального количества данных. Нагружение производилось поэтапно – на каждом этапе нагружение увеличивалось на 3-5% от предполагаемой разрушающей нагрузки. Между нагружениями выдерживалась пауза 5 минут, она увеличивалась до 15 минут после образования трещин в конструкции. На каждом этапе нагружения считывались данные по показаниям тензодатчиков и прогибомеров, после образования трещин данные считывались дважды – сразу после нагружения и по прошествии 15 минут. Испытываемая конструкция во время выдерживания паузы осматривалась на предмет образования трещин. Замеченные трещины помечались маркером, также арабскими цифрами обозначался их порядковый номер, а римскими цифрами – этап нагружения на котором они появились. Ширина раскрытия предполагаемой разрушающей трещины измерялась микроскопом в трех местах: в точке пересечения со стержнем основного армирования, в точке пересечения с ближайшим хомутом и посередине между ними. После завершения эксперимента картина трещин зарисовывалась на специальные планшеты в масштабе 1:1 (см. рисунок 4).

В ходе проведения эксперимента наблюдалась определенная закономерность – трещины, по которым происходило разрушение конструкций балочного типа появлялись на боковых гранях образцов.

Экспериментальные исследования позволили заметно уточнить зависимости для определения прогибов, углов поворота крайних сечений (рисунок 5), напряжений в сжатой зоне бетона (рисунок 6).

Экспериментально определены следующие параметры: ширина раскрытия трещин вдоль всего профиля трещины, на уровне центров продольной и поперечной растянутой арматуры, углы поворота торцевых сечений, деформации бетона с обеих сторон сжатой зоны, а также прогибы в средней части и в крайних сечениях конструкции при сложном напряженно-деформированном состоянии кручения с изгибом.

На приведенных графиках можно проследить характерные зависимости: при небольших значениях приложенной нагрузки углы поворота медленно растут с её увеличением, что выражается в большом угле наклона графиков, но чем сильнее растет нагрузка, тем быстрее начинают расти углы поворота, график становится значительно более пологим, это продолжается до момента разрушения. Наибольшие значения углов поворота, зафиксированные в эксперименте при нагрузке 1620 кгс для элемента Б2-ПР-400 (рисунок 5).

Обработка показаний тензорезисторов.

Плоское напряженное состояние характеризуется величинами главных деформаций ε_1 и ε_2 , а также углом α между направлением ε_1 и другим известным базовым направлением. Показания розеток тензорезисторов обрабатывались для получения значений этих величин при нагрузке равной 0,6; 0,8 и 1 от разрушающей по следующим формулам:

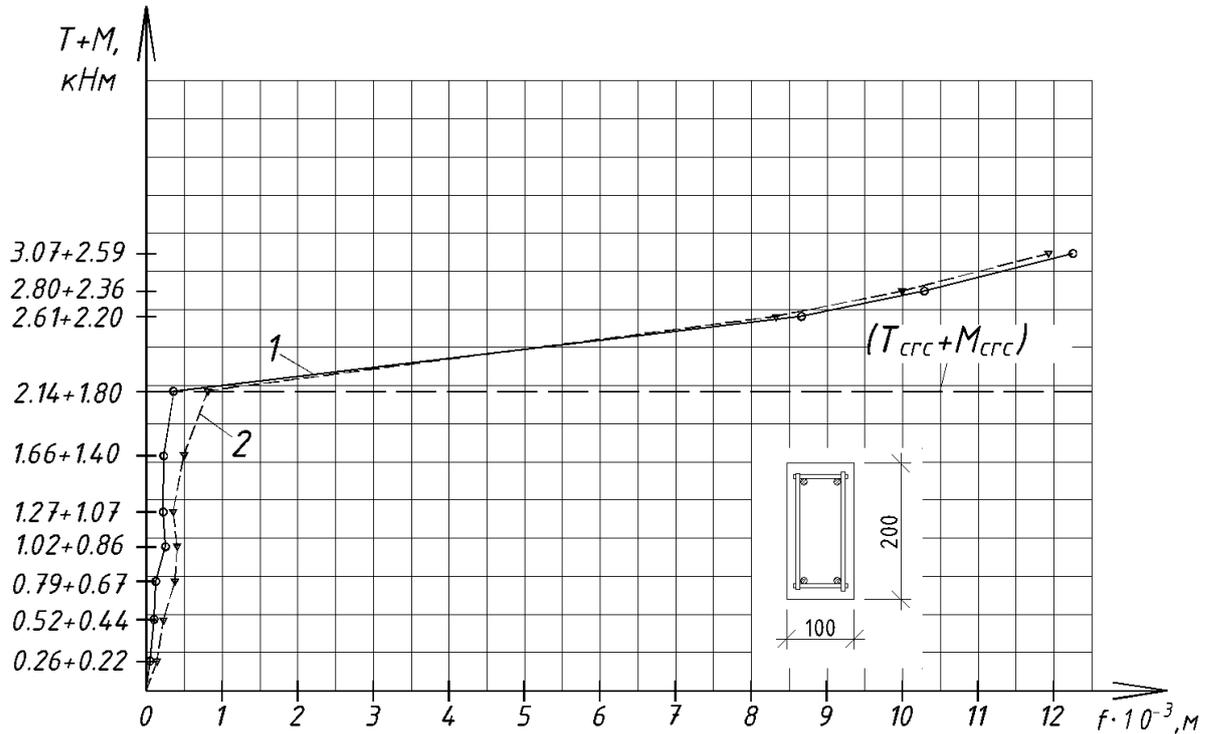
$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{90}}{2} + \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{45})^2 + (\varepsilon_{45} - \varepsilon_{90})^2}, \quad (1)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{90}}{2} - \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{45})^2 + (\varepsilon_{45} - \varepsilon_{90})^2}, \quad (2)$$

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{2\varepsilon_{45} - (\varepsilon_0 + \varepsilon_{90})}{\varepsilon_0 - \varepsilon_{90}}, \quad (3)$$

Где ε_0 , ε_{45} , ε_{90} – значения деформаций тензорезисторов расположенных под углами 0° , 45° и 90° к продольной оси экспериментального образца соответственно.

а)



б)

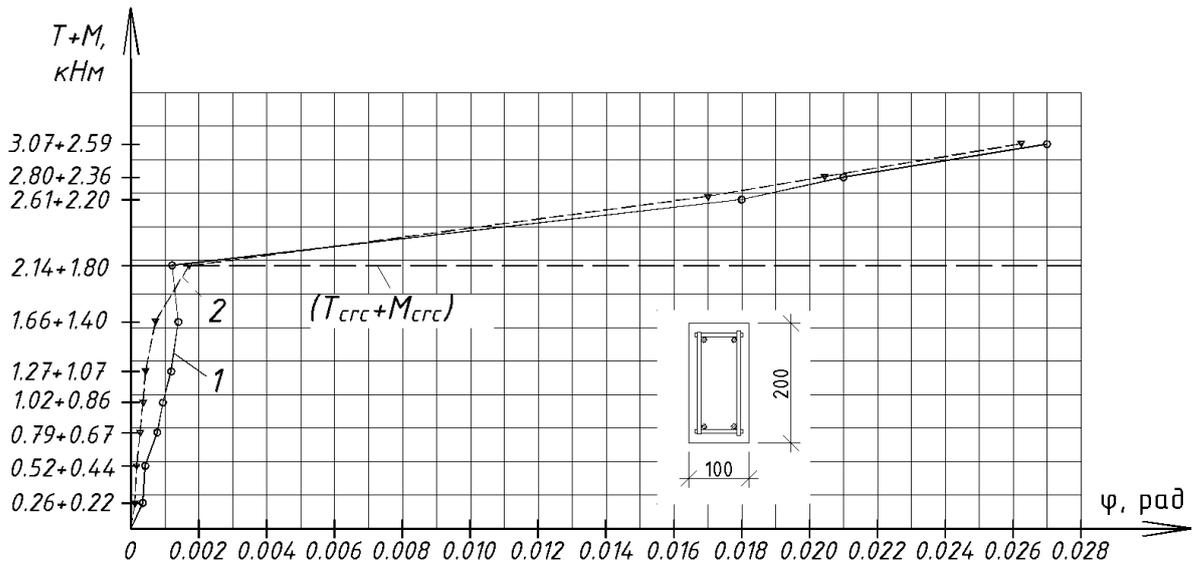


Рисунок 5 – Графики прогибов (а) и углов поворота (б) опытной железобетонной конструкции Б2-ПР-400

Для примера рассмотрим обработку показаний тензорезисторов на экспериментальной конструкции Б2-ПР-400 (рисунок б).

Применительно к Б2-ПР-400 сторона А (рисунок б) получим:

Степень нагружения $\frac{P_i}{P_{\max}} = 1,0$.

$$\varepsilon_1 = \frac{(-130)+8}{2} + \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{((-130)-(-110))^2 + ((-110)-8)^2} = 23.63 \cdot (10^{-5}) \quad (4)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{(-130)+8}{2} - \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{((-130)-(-110))^2 + ((-110)-8)^2} = -145.38 \cdot (10^{-5}) \quad (5)$$

$$\operatorname{tg} 2\varphi = \frac{2(-110) - ((-130) + 8)}{(-130) - 8} = 0,71(18\text{град}) \quad (6)$$

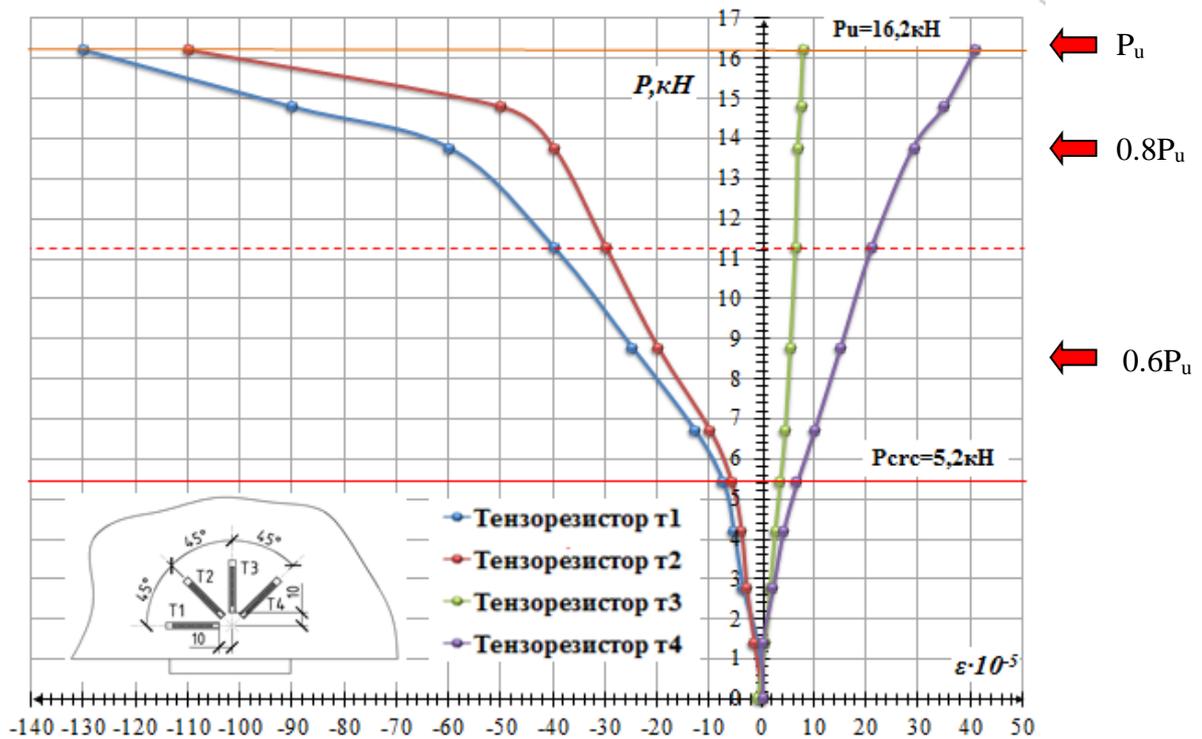


Рисунок 6 – Графики зависимости деформаций бетона от нагрузки для опытной конструкции Б2-ПР-400, сторона А

Степень нагружения $\frac{P_i}{P_{\max}} = 0,8$

$$\varepsilon_1 = \frac{(-54) + 7}{2} + \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{((-54) - (-38))^2 + ((-38) - 7)^2} = 10,2 (10^{-5}) \quad (7)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{(-54) + 7}{2} - \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{((-54) - (-38))^2 + ((-38) - 7)^2} = -57,2 (10^{-5}) \quad (8)$$

$$\operatorname{tg} 2\varphi = \frac{2(-38) - ((-54) + 7)}{(-54) - 7} = 0,48(13\text{град})$$

Степень нагружения $\frac{P_i}{P_{\max}} = 0,6$

$$\varepsilon_1 = \frac{(-30) + 5}{2} + \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{((-30) - (-24))^2 + ((-24) - 5)^2} = 8,38 (\cdot 10^{-5}) \quad (9)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{(-30) + 5}{2} - \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{((-30) - (-24))^2 + ((-24) - 5)^2} = -33,4 (\cdot 10^{-5}) \quad (10)$$

$$\operatorname{tg} 2\varphi = \frac{2(-24) - ((-30) + 5)}{(-30) - 5} = 0,66(17\text{град}) \quad (11)$$

Выводы

Разработана методика и программа экспериментальных исследований железобетонных конструкций прямоугольного сечения для крестообразной пространственной трещины при кручении с изгибом, основной целью которой является апробация принятых расчетных предпосылок, а также предлагаемого расчетного аппарата и

экспериментальное определение расчетных параметров предлагаемой методики расчета. Помимо того, в ходе исследований происходит получение данных о сложном напряженно-деформированном состоянии при совместном действии кручения с изгибом.

Проведенные экспериментальные исследования предоставляют возможность проверки расчетной модели при совместном действии кручения с изгибом и позволяют убедиться в адекватности рабочих гипотез при изменении пролетов $\frac{a}{h_0}$, величин крутящего и изгибающего моментов, а также уточнить закономерности для определения прогибов, углов поворота крайних сечений и напряжений в сжатой зоне бетона. Для анализа в статье приведены типичная для эксперимента схема образования и развития трещин в виде развертки, а также характерные графики зависимости прогибов и углов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондаренко В.М., Колчунов В.И. Расчетные модели силового сопротивления железобетона: монография. М.: Изд-во АСВ, 2004. 472 с.
2. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения : СП 63.13330.2012. [Введены в действие с 2013-01-01]. М.: Министерство регионального развития РФ, 2012. 156 с. (Свод правил. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003).
3. Гольшев А.Б., Колчунов В.И. Сопротивление железобетона: монография. К.: Основа, 2009. 432 с.
4. Демьянов А.И., Колчунов В.И., Сальников А.С., Михайлов М.М. Расчетные модели статико-динамического деформирования железобетонной конструкции при кручении с изгибом в момент образования пространственной трещины // Строительство и реконструкция. 2017. №3 (71). С. 13–22.
5. Демьянов А.И., Сальников А.С., Колчунов В.И. Экспериментальные исследования железобетонных конструкций при кручении с изгибом и анализ их результатов // Строительство и реконструкция. 2017. №4(72). С. 17– 26.
6. Демьянов А.И., Наумов Н.В., Колчунов В.И. Программа и методика экспериментальных исследований составных железобетонных конструкций при кручении с изгибом // Строительство и реконструкция. 2018. №1(75). С. 22– 30.
7. Демьянов А.И., Наумов Н.В., Колчунов В.И. Некоторые результаты экспериментальных исследований составных железобетонных конструкций при кручении с изгибом // Строительство и реконструкция. 2018. №5(79). С. 13– 23.
8. Ключева Н. В., Яковенко И.А., Усенко Н.В. К расчету ширины раскрытия наклонных трещин третьего типа в составных железобетонных конструкциях // Промышленное и гражданское строительство. 2014. №2. С. 8–11.
9. Ключева Н.В., Колчунов В.И., Рыпаков Д.А. Бухтиярова А.С. Жилые и общественные здания из железобетонных панельно-рамных элементов индустриального производства // Жилищное строительство. 2015. №5. С. 69–75
10. Колчунов В.И., Яковенко И.А. Расчетная модель статико-динамического деформирования железобетонные изгибаемых конструкций в момент разрушения бетонной растянутой матрицы // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. 2016. Вип. 3(98). Ч. 1. С. 56–62.
11. Колчунов В.И., Сальников А.С. Экспериментальные исследования трещинообразования железобетонных конструкций при кручении с изгибом // Строительство и реконструкция. 2016. № 3(65). С. 24–32.
12. Колчунов В.И., Демьянов А.И., Михайлов М.М. Расчетные модели статико-динамического деформирования системы железобетонных конструкций в момент разрушения сжатого бетона при кручении с изгибом // Строительная механика и расчет сооружений. 2019. №2. С. 17-26.
13. Сальников А.С., Ключева Н.В., Колчунов В.И. Метод определения минимальной нагрузки и координат образования пространственной трещины в железобетонных конструкциях при кручении с изгибом // Промышленное и гражданское строительство. 2016. №1. С. 52–57.
14. Сальников А.С., Колчунов В.И., Яковенко И.А. Расчетная модель образования пространственных трещин первого вида при кручении с изгибом // Промышленное и гражданское строительство. 2015. №3. С. 35–40.
15. Сальников А.С., Колчунов В.И., Колчунов В.И. Методика расчета предельной нагрузки и координат образования пространственной трещины первого вида в железобетонных конструкциях при кручении с изгибом // Строительство и реконструкция. 2015. №6(62). С. 49– 56.
16. Травуш В.И., Карпенко Н.И., Колчунов В.И., Каприелов С.С., Демьянов А.И., Конорев А.И. Основные результаты экспериментальных исследований железобетонных конструкций из высокопрочного

бетона В100 круглого и кольцевого сечений при кручении с изгибом // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2019. № 15(1). С. 51-61.

17. Awadh E.A. Torsion plus bending and shear on reinforced concrete beams. *Journal of Engineering and Sustainable Development*. 2016. No.4. P. 277–288

18. David A. E., Thomas L. H., Simon A. N., Jonathan E. C. Veering and nonlinear interactions of a clamped beam in bending and torsion // *Journal of Sound and Vibration*. 2018. Vol. 416. Pp. 1-16.

19. Ogawa Y., Kawasaki Y., Okamoto T. Fracture behavior of RC members subjected to bending shear and torsion using acoustic emission method // *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 67. Pp. 165–169.

20. Khaldoun Rahal. Combined Torsion and Bending in Reinforced and Prestressed Concrete beams Using Simplified Method for Combined Stress-Resultants. *ACI Structural Journal*. 2007. Vol. 104. No. 4. Pp. 402–411.

REFERENCES

1. Bondarenko V.M., Kolchunov V.I. The computational model of a power resistance of reinforced concrete [Computational models of the force resistance of reinforced concrete: monograph]. Moscow, ASV Publ., 2004. 472 p. (rus)

2. Betonnye i zhelezobetonnye konstrukcii. Osnovnye polozheniya: SP 63.13330.2012. [Vvedeny v dejstvie s 2013–01–01]. M.: Ministerstvo regional'nogo razvitiya RF, 2012. 156 s. (Svod pravil. Aktualizirovannaya redakciya SNiP 52–01–2003) (rus)

3. Golishev A.B., Kolchunov V.I. The resistance of reinforced concrete [Resistance of reinforced concrete: monograph]. Kiev, Osnova Publ., 2009. 432 p. (rus)

4. Demyanov A.I., Kolchunov V.I., Salnikov A.S., Mihajlov M. M. Raschetnye modeli statiko-dinamicheskogo deformirovaniya zhelezobetonnoj konstrukcii pri kruchenii s izgibom v moment obrazovaniya prostranstvennoj treshchiny [Computational models of static-dynamic deformation of a reinforced concrete structure during torsion with a bend at the moment of formation of a spatial crack]. *Stroitel'stvo i rekonstrukciya*. 2017. No.3 (71). Pp. 13–22. (rus)

5. Demyanov A.I., Kolchunov V.I., Salnikov A.S. Eksperimentalnye issledovaniya zhelezobetonnykh konstrukcij pri kruchenii s izgibom i analiz ih rezultatov [Experimental studies of reinforced concrete structures under torsion with bending and analysis of their results]. *Stroitel'stvo i rekonstrukciya*. 2017. No. 4 (72). Pp. 17–26. (rus)

6. Demyanov, A.I., Kolchunov V.I., Naumov N.V. Programma i metodika eksperimental'nykh issledovanij sostavnykh zhelezobetonnykh konstrukcij pri kruchenii s izgibom [Program and methodology for experimental studies of composite reinforced concrete structures under torsion with a bend]. *Stroitel'stvo i rekonstrukciya*. 2018. No. 1(75). Pp. 22–30. (rus)

7. Demyanov A.I., Kolchunov V.I., Naumov N.V. Nekotorye rezul'taty eksperimental'nykh issledovanij sostavnykh zhelezobetonnykh konstrukcij pri kruchenii s izgibom [Some results of experimental studies of composite reinforced concrete structures under torsion with a bend]. *Stroitel'stvo i rekonstrukciya*. 2018. No. 5(79). Pp. 13–23. (rus)

8. Klyueva N.V., Yakovenko I.A., Usenko N.V. K raschetu shiriny raskrytiya naklonnykh treshchin tret'ego tipa v sostavnykh zhelezobetonnykh konstrukciyah [To calculate the opening width of inclined cracks of the third type in composite reinforced concrete structures]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2014. No. 2. Pp. 8–11. (rus)

9. Klyueva N.V., Kolchunov V.I., Rypakov D.A. Buhtiyarova A.S. ZHilye i obshchestvennye zdaniya iz zhelezo-betonnykh panelno-ramnykh elementov industrial'nogo proizvodstva [Residential and public buildings made of reinforced concrete panel-frame elements of industrial production]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo*. 2015. No. 5. Pp. 69–75. (rus)

10. Kolchunov V.I., Yakovenko I.A. Raschetnaya model' statiko-dinamicheskogo deformirovaniya zhelezobetonnye izgibaemykh konstrukcij v moment razrusheniya betonnoj rastyanutoj matricy [Computational model of static-dynamic deformation of reinforced concrete flexed structures at the moment of destruction of a concrete stretched matrix]. *Visnik Kre-menchuckogo nacionalnogo universitetu imeni Mihajla Ostrogradskogo*. 2016. No. 3(98). Vol. 1. Pp. 56–62. (rus)

11. Kolchunov V.I., Salnikov A.S. Eksperimental'nye issledovaniya treshchinoobrazovaniya zhelezobetonnykh konstrukcij pri kruchenii s izgibom [Experimental studies of crack formation of reinforced concrete structures during torsion with bending]. *Stroitel'stvo i rekonstrukciya*. 2016. No. 3(65). Pp. 24–32. (rus)

12. Kolchunov V.I., Demyanov A.I., Mihajlov M.M. Raschetnye modeli statiko-dinamicheskogo deformirovaniya sistemy zhelezobetonnykh konstrukcij v moment razrusheniya szhatogo betona pri kruchenii s izgibom [Calculation models of static-dynamic deformation of a system of reinforced concrete structures at the moment of destruction of compressed concrete during torsion with bending]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenij*. 2019. No.2. Pp. 17-26. (rus)

13. Salnikov A.S., Kolchunov V.I., Klyueva N.V. Metod opredeleniya minimal'noj nagruzki i koordinat obrazovaniya prostranstvennoj treshchiny v zhelezobetonnykh konstrukciyah pri kruchenii s izgibom [Method for determining the minimum load and coordinates of spatial crack formation in reinforced concrete structures during torsion with bending]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2016. No.1. Pp. 52–57. (rus)

14. Salnikov A.S., Kolchunov V.I., Yakovenko I.A. Raschetnaya model' obrazovaniya prostranstvennyh treshchin pervogo vida pri kruchenii s izgibom [Calculation model for the formation of spatial cracks of the first type in torsion with bending]. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2015. No.3. Pp. 35–40. (rus)
15. Salnikov A.S., Kolchunov V.I., Kolchunov V.I. Metodika rascheta predel'noj nagruzki i koordinat obrazovaniya prostranstvennoj treshchiny pervogo vida v zhelezobetonnyh konstrukciyah pri kruchenii s izgibom [Method for calculating the maximum load and coordinates of the formation of a spatial crack of the first type in reinforced concrete structures during torsion with bending]. Stroitel'stvo i rekonstrukciya. 2015. No. 6(62). Pp. 49– 56. (rus)
16. Travush V.I, Karpenko N.I., Kolchunov V.I., Kapriyelov S.S., Dem'yanov A.I., Konorev A.I. Osnovnye rezul'taty eksperimental'nyh issledovaniy zhelezobetonnyh konstrukcij iz vysokoprochnogo betona V100 kruglogo i kol'cevogo sechenij pri kruchenii s izgibom [Main results of experimental studies of reinforced concrete structures of high-strength concrete B100 round and circular cross sections in torsion with bending]. Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings, No. 15(1). Pp. 51-61. (rus)
17. Awadh E.A. Torsion plus bending and shear on reinforced concrete beams. Journal of Engineering and Sustainable Development. 2016. No.4. P. 277– 288
18. David A.E., Thomas L.H., Simon A.N., Jonathan E.C. Veering and nonlinear interactions of a clamped beam in bending and torsion. Journal of Sound and Vibration. 2018. Vol. 416. Pp. 1-16.
19. Ogawa Y., Kawasaki Y., Okamoto T. Fracture behavior of RC members subjected to bending shear and torsion using acoustic emission method. Construction and Building Materials. 2014. Vol. 67. Pp. 165–169.
20. Khaldoun Rahal. Combined Torsion and Bending in Reinforced and Prestressed Concrete beams Using Simplified Method for Combined Stress-Resultants. ACI Structural Journal. 2007. Vol. 104. No. 4. Pp. 402–411.

Информация об авторах:

Колчунов Владимир Иванович

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Россия,
доктор технических наук, профессор кафедры уникальных зданий и сооружений.
E-mail: vlik52@mail.ru

Демьянов Алексей Иванович

ФГБОУ «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Россия,
кандидат технических наук, доцент кафедры уникальных зданий и сооружений.
E-mail: speccompany@gmail.com

Михайлов Михаил Михайлович

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Россия,
аспирант кафедры уникальных зданий и сооружений.
E-mail: mixail.mixajloff2013@yandex.ru

Information about authors:

Kolchunov Vladimir Iv.

South-West State University, Kursk, Russia,
doctor of technical sciences, professor of the department of unique building and structures.
E-mail: vlik52@mail.ru

Demyanov Alexey I.

South-Western State University, Kursk, Russia,
candidate of technical sciences, associate professor of the department of unique buildings and structures.
E-mail: speccompany@gmail.com

Mihailov Mihail M.

South-West State University, Kursk, Russia,
postgraduate student, department of unique building and structures.
E-mail: mixail.mixajloff2013@yandex.ru