

ВЛ.И. КОЛЧУНОВ¹, А.И. ДЕМЬЯНОВ¹, И.В. ПЕЧЕНЕВ¹

¹Юго-Западный Государственный Университет, г. Курск, Россия

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ КОНСТРУКЦИЙ КВАДРАТНОГО СЕЧЕНИЯ ПРИ КРУЧЕНИИ С ИЗГИБОМ

Аннотация. Приведены результаты экспериментальных исследований сложного сопротивления железобетонных конструкций квадратного поперечного сечения из тяжелого бетона класса В25 при кручении с изгибом: графики прогибов и углов поворота, зависимости деформаций бетона, полученные по показаниям розеток электротензорезисторов, по отношению к исследуемому сечению. Также, определены главные деформации удлинения (укорочения) с использованием данных, полученных по показаниям розеток электротензорезисторов. Арматура испытываемых образцов специально подобрана таким образом, чтобы в стадии, предшествующей разрушению в ней достигалась текучесть. Наличие экспериментальных данных подобного рода требуется для оценки предложенных методов расчета конструкций прямоугольного поперечного сечения при рассматриваемом напряженно-деформированном состоянии, например, для проверки значений обобщенной нагрузки трещинообразования, ее величины относительно предельной разрушающей нагрузки, расстояния между трещинами на разных уровнях трещинообразования, ширины раскрытия трещин на уровне оси рабочей арматуры и на удалении двух диаметров от осей арматуры, а также вдоль всего профиля трещины на различных ступенях нагружения конструкции, координат точек образования пространственных трещин, схем образования, развития и раскрытия трещин. При проведении экспериментальных исследований установлено, что в испытываемых конструкциях ширина раскрытия трещин на уровне оси рабочей арматуры в два-три раза меньше, чем на расстоянии двух диаметров от оси рабочей арматуры. Благодаря полученным в ходе испытаний значениям параметров и картинам трещин возможно уточнить рабочие гипотезы и предпосылки, использованные для построения расчетной модели сопротивления железобетонных конструкций прямоугольного поперечного сечения при кручении с изгибом.

Ключевые слова: экспериментальные исследования, кручение с изгибом, сложное напряженно-деформированное состояние, железобетонные конструкции, пространственная трещина.

VL.I. KOLCHUNOV¹, A.I. DEMYANOV¹, I.V. PECHENEV¹

¹South-Western State University, Kursk, Russia

RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDIES OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES WITH SQUARE CROSS SECTIONS IN TORSION WITH BENDING

Abstract. The article presents the results of experimental studies of the complex resistance of reinforced concrete structures with a square cross-section, made of B25 heavy-concrete, which includes graphs of deflection and rotation angles, as well as the dependence of concrete deformations obtained from the indications of strain gauges. The main deformations of elongation (and shortening) of concrete were determined using data, obtained from the proposed scheme for installing strain gauges. Rebar for experimental samples was selected in such a way that it achieved yield stress in the stage before destruction. The obtained experimental data is required for evaluation of proposed methods for

calculation of structures with a rectangle cross section structures in the considered stress-strain state, for example, to check the values of the general load of crack appearing, its value relative to the distruction load; distance between cracks at different levels of crack formation, width of cracks opening at the level of the main reinforcement axis and at the distance of two diameters from the reinforcement axis, coordinates of spatial cracks formation, schemes of crack formation, crack development and crack opening. It was found, that in the tested structures the width of crack opening at the level of the main reinforcement axis is two to three times less than at a distance of two diameters from the main longitudinal (or transverse) reinforcement axis. The parameters and crack patterns established during the experiments allow us to clarify the accepted working hypotheses for constructing a calculation model of the resistance in reinforced concrete structures of rectangular cross-section under torsion with bending.

Keywords: *experimental studies, torsion with bending, complex stress-strain state, reinforced concrete structures, spatial crack.*

1 Введение

Широкое использование железобетонных конструкций в современном проектировании и строительстве ведет к усложнению видов напряженного состояния в таких конструкциях. Стремление к разнообразию и самобытности при создании архитектурного облика зданий и сооружений также приводит к необходимости использования элементов конструкций, работающих в условиях сложного сопротивления. Все это, в совокупности влечет за собой необходимость экспериментально-теоретических исследований работы железобетона в сложных напряженных состояниях. Кручение с изгибом можно выделить как распространенный частный случай такого состояния. Поведение железобетонных элементов, находящихся под действием крутящего и изгибающего моментов, на сегодняшний день изучено недостаточно глубоко. Об этом свидетельствует тот факт, что в Российских и зарубежных нормативных документах отсутствуют детальные рекомендации по проектированию конструкций при кручении с изгибом, а приведенные расчетные положения относятся лишь к первой группе предельных состояний и касаются только частных случаев видов сечений, схем армирования и видов напряженного состояния, которые не всегда согласуются с реальной работой железобетона в стадии образования, развития трещин, а также в предельной стадии их сопротивления.

Несмотря на то, что значительная часть теоретических и экспериментальных научных исследований в этой области проводилась для конструкций прямоугольного сечения [3–6, 8–12], все еще остаются открытыми некоторые вопросы об особенностях деформирования и трещинообразования таких конструкций.

В данной статье представлены некоторые результаты экспериментальных исследований жесткости и трещиностойкости железобетонных балок квадратного поперечного сечения из бетона В25 при кручении с изгибом.

2 Результаты исследований и их анализ

В работах [7, 13, 14] авторами был предложен общий метод расчета железобетонных конструкций с сечениями произвольной формы при кручении с изгибом. Для проверки достоверности предлагаемого расчетного аппарата были проведены экспериментальные исследования по специально разработанной методике при кручении с изгибом, позволяющие опытным путем установить ряд новых параметров, заложенных в расчетной модели. Армирование, характеристики и маркировка опытных конструкций, а также методика их испытаний приведена в работах [15–17].

Полученные опытные данные и их анализ позволяют отметить следующее. Характерной особенностью трещинообразования в конструкциях квадратного поперечного сечения являлось то, что при кручении с соотношением крутящего и изгибающего момента более единицы и нагрузках, превышающих нагрузки трещинообразования, на поверхности опытной конструкции происходит образование небольшого числа трещин (рисунок 1), из которых лишь одна-две носят магистральный характер. До момента разрушения в конструкции, как правило, образуется один-два уровня трещин. При дальнейшем увеличении

нагрузок из образовавшихся трещин быстро выделяется одна, та, которая впоследствии и становится разрушающей. Эта трещина на ступенях, близких к разрушению, начинает превалировать над остальными и достигает максимальной ширины раскрытия к моменту разрушения.

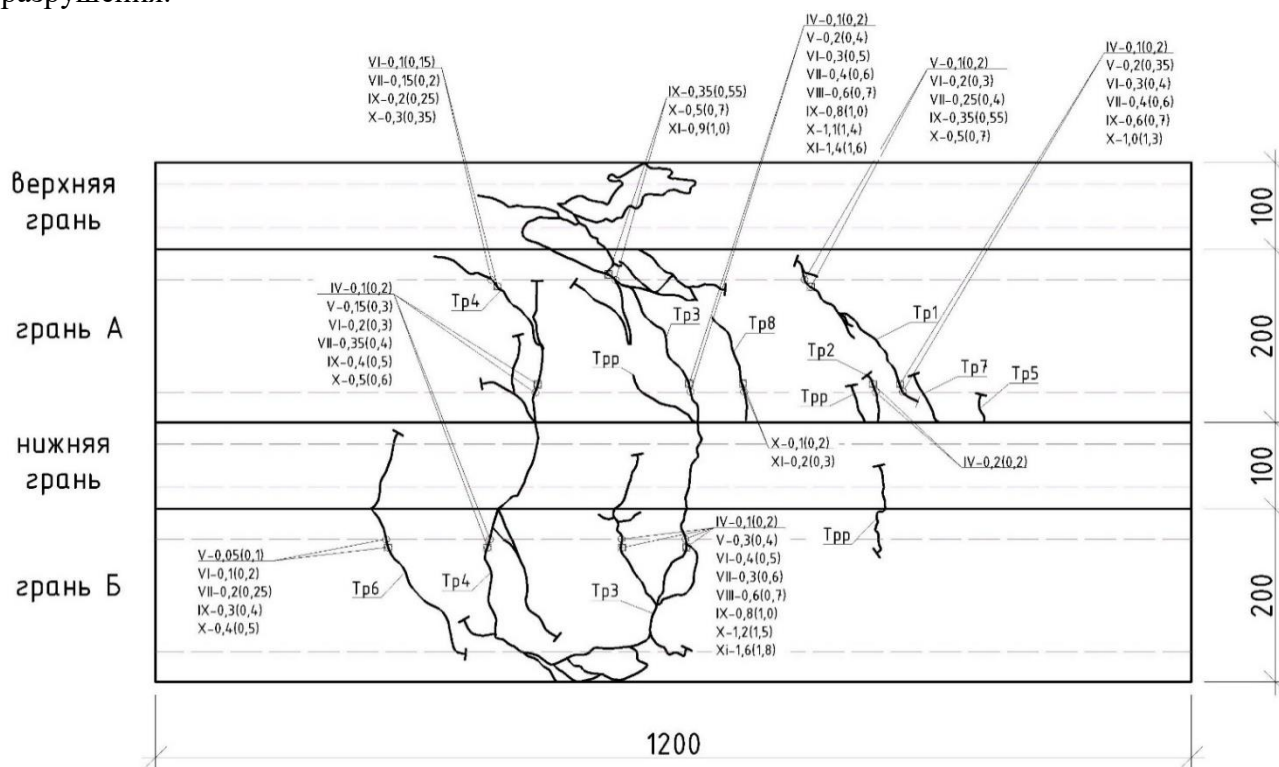


Рисунок 1 – Картина трещинообразования в экспериментальной опытной конструкции Б-КВ-720 (1)

Уместно отметить, что количество трещин увеличивалось по мере увеличения нагрузки. При этом новые трещины образовывались на конкретном уровне нагружения в промежутках расстояний между уже образовавшимися на предыдущих этапах нагружения трещинами, т.е. трещинообразование носило уровневый характер, хотя и не слишком ярко выраженный [1, 2].

Испытания каждой экспериментальной конструкции сопровождалось ведением специального журнала испытаний в котором фиксировались опытные значения опорной реакции конструкций балок на этапе образования первых трещин ($R_{sup,crc}$) и на этапе предельной нагрузки перед разрушением ($R_{sup,max}$), максимальная величина нагрузки на балку (P_{max}), относительный уровень ступени нагружения (P_i/P_{max}), ширина раскрытия прогрессирующей пространственной трещины по которой произошло разрушение, а также значение проекций пространственных трещин на горизонталь, координаты образования прогрессирующей пространственной трещины (x_{exp} , y_{exp}) и фактическая высота сжатой зоны в пространственном сечении (x_{fact}). Полученные данные обработаны, систематизированы и приведены в таблице 1.

В процессе испытаний на каждом этапе нагружения были измерены прогибы конструкций опытных балок (рисунок 2) и перемещения установленных по концам опытных балок жестких консолей, по которым были вычислены углы поворота в конструкциях (рисунок 3). Анализируя графики можно отметить, что уровень нагрузки трещинообразования в опытных конструкциях балок Б-КВ-720 (1) и Б-КВ-720 (2) составил порядка 0.6 от разрушающей нагрузки. Этот относительный показатель значительно выше, чем для балок нагруженных только изгибающим моментом. Из этого следует, что при кручении с изгибом и относительно высоких уровнях напряженного состояния от кручения

($T/M > 1$), когда доля касательных напряжений в общей структуре сложного напряженного состояния пространственного сечения значительна, относительная трещиностойкость конструкции повышается, т.е. относительный диапазон работы конструкции без трещин на всей диаграмме деформирования увеличивается.

Сопоставляя приведенные графики углов поворота и прогибов опытной конструкции балки Б-КВ-720 (1) квадратного поперечного сечения можно видеть, что после образования трещин падение изгибной жесткости конструкции происходит более интенсивно, чем жесткости конструкции на кручение. Это может быть объяснено проявлением сил нагельного эффекта и сил зацепления в пространственной трещине.

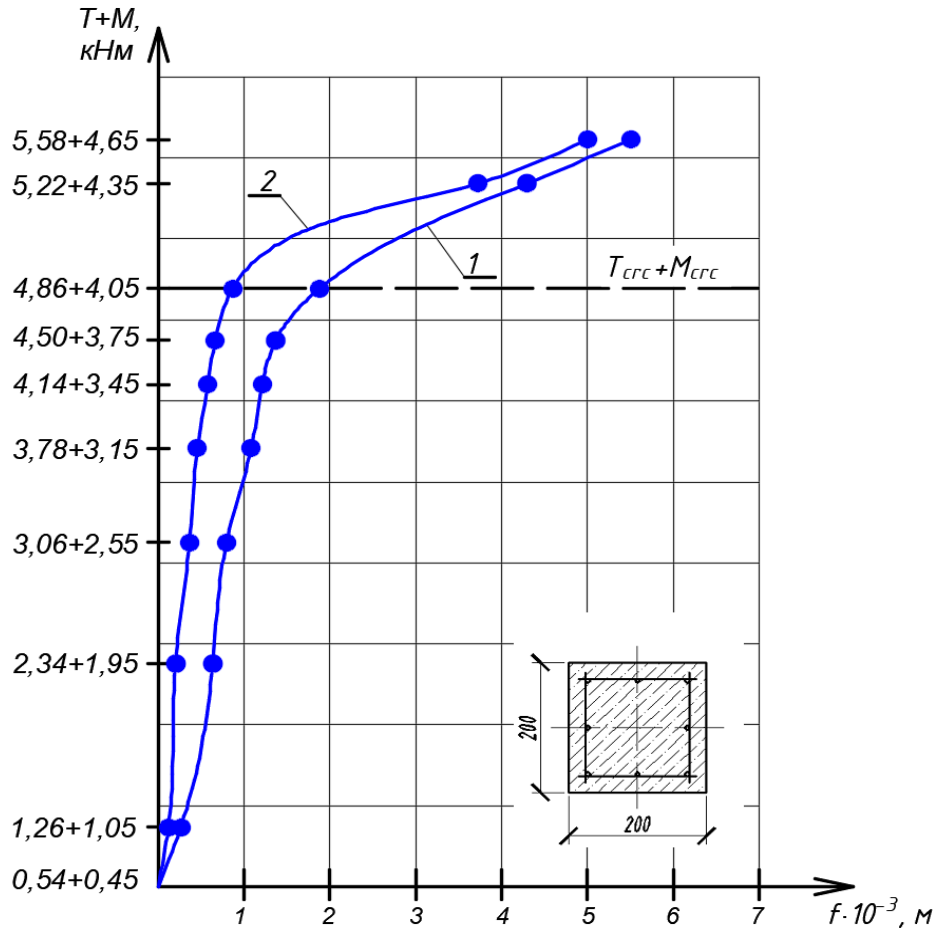


Рисунок 2 – Графики прогибов опытной конструкции Б-КВ-720 (1):

1 – прогиб по индикатору И2; 2 – прогиб по индикатору И3

По показаниям тензорезисторов установленным в виде розеток в сжатой зоне грани А и грани В для опытной конструкции Б-КВ-720 (1) построены графики «нагрузка – относительная деформация». Показания розеток тензорезисторов обрабатывались в соответствии с формулой для определения главных деформаций удлинения (укорочения) бетона:

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

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

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

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

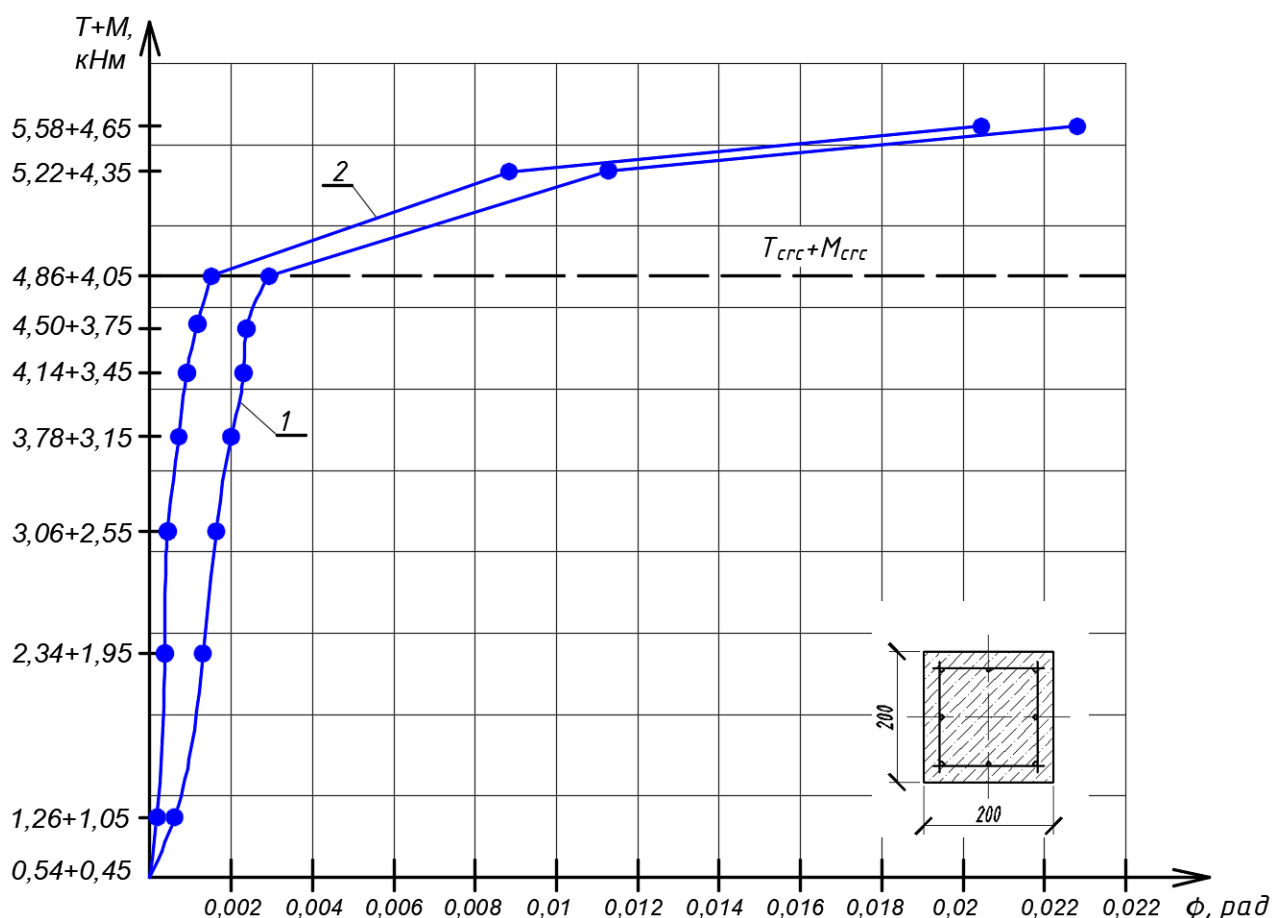


Рисунок 3 – Графики углов поворота опытной конструкции Б-КВ-720 (1):

1 – угол поворота по индикаторам И1-И2; 2 – угол поворота по индикаторам И3-И4

Показания розеток тензорезисторов обрабатывались для получения значений этих величин при различных уровнях нагружения (рисунок 4). В частности, для экспериментальной конструкции Б-КВ-720 (1) (сторона А) при нагрузках равной 0,6; 0,8 и 1 от разрушающей получено:

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

$$\varepsilon_1 = \frac{-610 + 260}{2} + \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{((-610) - (-860))^2 + ((-860) - 260)^2} = 636,4;$$

$$\varepsilon_2 = \frac{-610 + 260}{2} - \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{((-610) - (-860))^2 + ((-860) - 260)^2} = -986,4;$$

$$\operatorname{tg} 2\varphi = \frac{2 \cdot (-860) - ((-610) + 260)}{-610 - 260} = 1,57 (29 \text{ град});$$

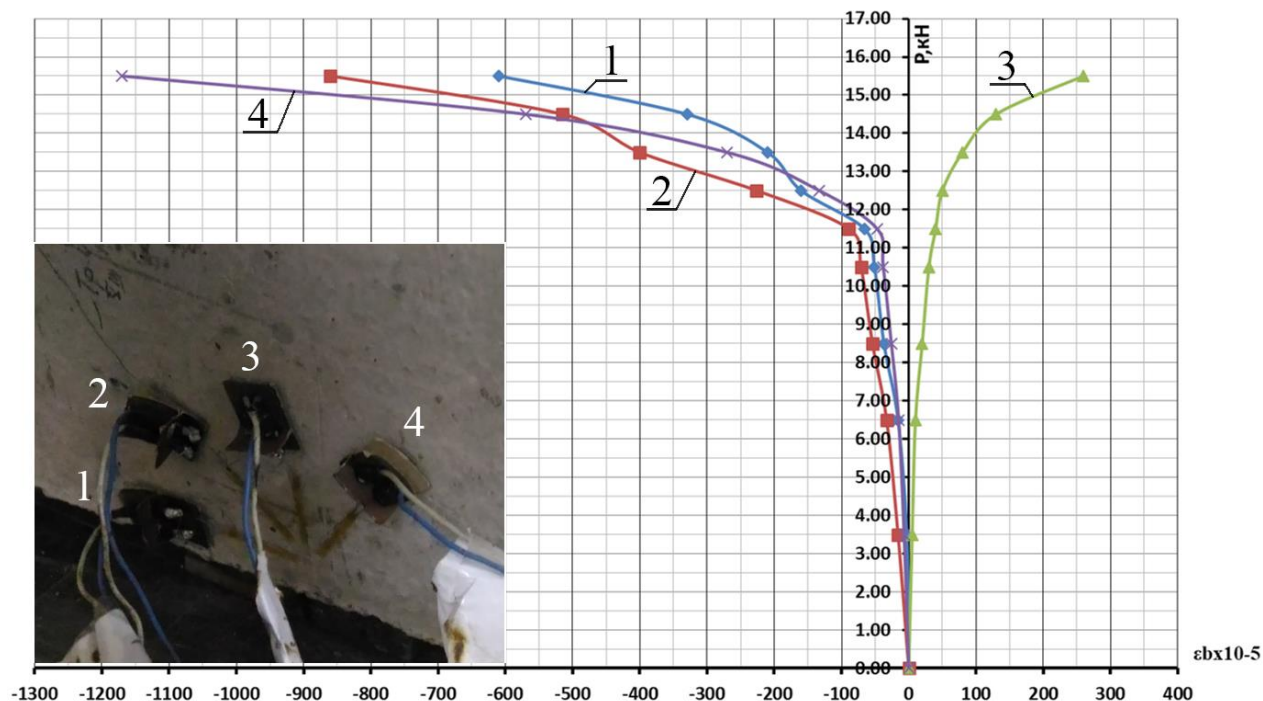
Степень нагружения $\frac{P_i}{P_{\max}} = 0,8$

$$\varepsilon_1 = \frac{-160 + 50}{2} + \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{((-160) - (-225))^2 + ((-225) - 50)^2} = 144,8;$$

$$\varepsilon_2 = \frac{-160 + 50}{2} - \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{((-160) - (-225))^2 + ((-225) - 50)^2} = -225,8;$$

$$\operatorname{tg} 2\varphi = \frac{2 \cdot (-225) - ((-160) + 50)}{-160 - 50} = 2,66 (34,7 \text{ град});$$

а)



б)

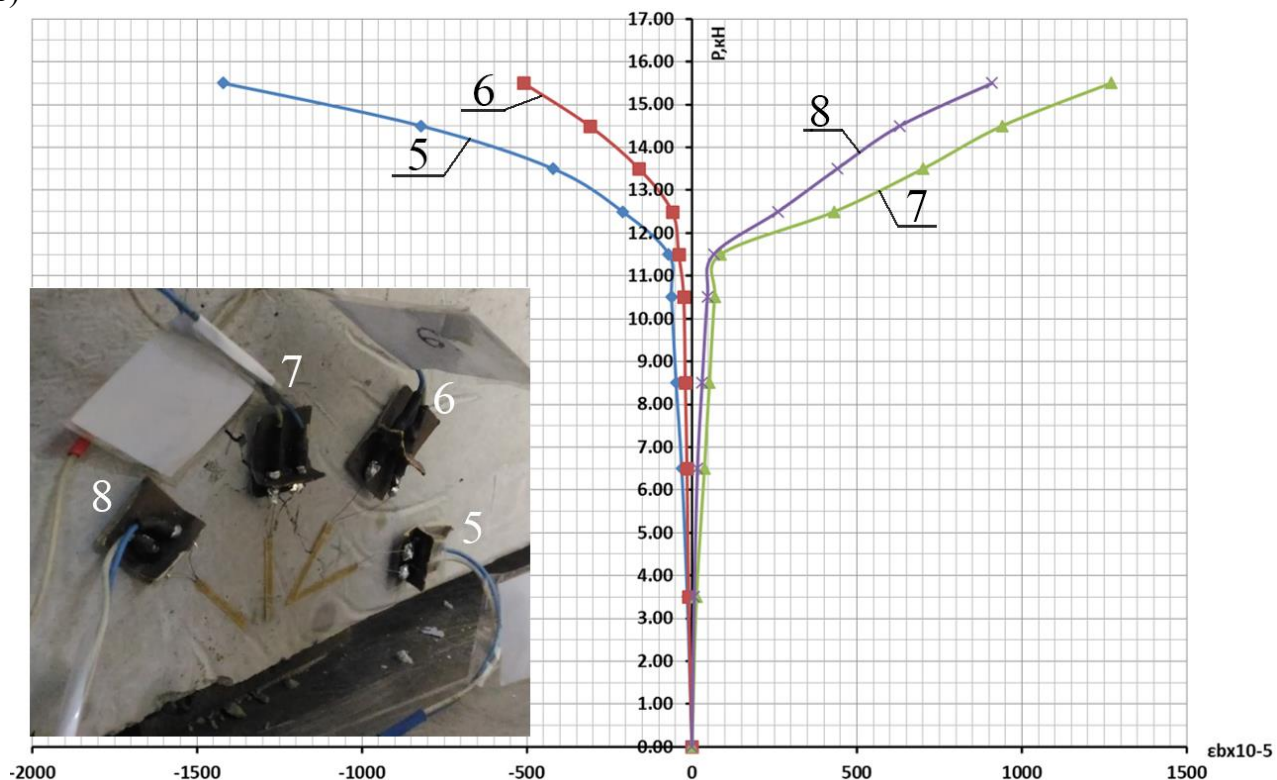


Рисунок 4 – Графики зависимости деформаций бетона от нагрузки для опытной конструкции Б-КВ-720(1): сторона А: 1,2,3,4-соответственно, по тензорезисторам 1-4 (а), сторона Б: 5,6,7,8-соответственно, по тензорезисторам 5-8 (б)

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

$$\varepsilon_1 = \frac{-37+20}{2} + \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{((-37)-(-54))^2 + ((-54)-20)^2} = 45,2;$$

$$\varepsilon_2 = \frac{-37+20}{2} - \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{((-37)-(-54))^2 + ((-54)-20)^2} = -62,2;$$

$$\operatorname{tg} 2\varphi = \frac{2 \cdot (-54) - ((-37) + 20)}{-37 - 20} = 1,6 (29 \text{ град}).$$

Аналогично для конструкции БФ-КВ-720 (1) (сторона Б), получено:

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

$$\varepsilon_1 = \frac{-1420+1270}{2} + \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{((-1420)-(-510))^2 + ((-510)-1270)^2} = 1334,4;$$

$$\varepsilon_2 = \frac{-1420+1270}{2} - \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{((-1420)-(-510))^2 + ((-510)-1270)^2} = -1484,4;$$

$$\operatorname{tg} 2\varphi = \frac{2 \cdot (-510) - ((-1420) + 1270)}{-1420 - 1270} = 0,32 (9 \text{ град});$$

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

$$\varepsilon_1 = \frac{-133-60}{2} + \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{((-133)-(-210))^2 + ((-210)-(-60))^2} = 101,4;$$

$$\varepsilon_2 = \frac{-133-60}{2} - \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{((-133)-(-210))^2 + ((-210)-(-60))^2} = -294,4;$$

$$\operatorname{tg} 2\varphi = \frac{2 \cdot (-210) - ((-133) + (-60))}{-133 - (-60)} = 3,11 (36,1 \text{ град});$$

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

$$\varepsilon_1 = \frac{-26-(-20)}{2} + \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{((-26)-(-48))^2 + ((-48)-(-20))^2} = 19,1;$$

$$\varepsilon_2 = \frac{-26-(-20)}{2} - \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{((-26)-(-48))^2 + ((-48)-(-20))^2} = -25,1;$$

$$\operatorname{tg} 2\varphi = \frac{2 \cdot (-48) - ((-26) + (-20))}{-26 - (-20)} = 8,33 (42 \text{ град});$$

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования железобетонных конструкций при кручении с изгибом позволили проверить разрабатываемую расчетную модель, ее рабочие предпосылки и выявить закономерности и параметры сопротивления железобетонных конструкций, такие как координаты образования пространственных трещин; обобщенная нагрузка трещинообразования $R_{\text{sup}, \text{crc}}$ и разрушения $R_{\text{sup}, u}$ ширина раскрытия трещин на уровне осей продольной и поперечной растянутой арматуры на удалении двух диаметров от осей арматуры и вдоль всего профиля трещины; изменения расстояния между трещинами l_{crc} и длины трещин h_{crc} по мере увеличения нагрузки; фибровые главные деформации сжатого бетона при сложном напряженно-деформированном состоянии (см. таблицу 1).

Таблица 1 – Экспериментальные параметры сопротивления железобетонных конструкций при кручении с изгибом

Шифр конструкции	$R_{sup,crc}$, кН	$R_{sup,max}$, кН	P_{max} , кН	Степень нагруже- ния, P_i/P_{max}	Пространственная трещина, по которой произошло разрушение			Фактическая высота сжатой зоны, X_{fact} , мм	Координаты образования пространствен- ной трещины	
					$a_{crc,1}$, мм	$a_{crc,2}$, мм	$l_{crc,max}$, мм		X_{exp} , мм	Y_{exp} , мм
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Б-КВ-720 (1) Сторона А	6.75	7.75	15.5	0.6	—	—	172	—	74,9	6,9
				0.8	6	8		62		
				1	14	16		0		
Б-КВ-720 (1) Сторона Б				0.6	—	—		—	- 86,8	14,9
				0.8	4	6		38		
				1	9	10		0		
Б-КВ-720 (2) Сторона А	7.25	8.75	17.5	0.6	—	—	195	—	114	8,4
				0.8	2	3		87		
				1	12	15		11		
Б-КВ-720 (2) Сторона Б				0.6	—	—		—	-86	16,4
				0.8	0.5	1		21		
				1	11	13		0		

В итоге данные, полученные в результате проведенных экспериментальных исследований предоставляют возможность проверить достоверность расчетного аппарата для железобетонных конструкций при сложном сопротивлении, вызванном совместным действием кручения с изгибом.

3 Выводы

1. При проведении экспериментальных исследований железобетонных конструкций квадратного поперечного сечения получены новые опытные данные о сложном напряженно-деформированном состоянии в сечениях таких конструкций, исследуемых при действии изгибающего и крутящего моментов. Определены такие опытные параметры как: значения обобщенной нагрузки трещинообразования $R_{sup,crc}$ и разрушения $R_{sup,u}$ уровень трещинообразующей нагрузки относительно предельной; расстояние между трещинами на разных уровнях трещинообразования, ширина раскрытия трещин на уровне оси рабочей арматуры на удалении двух диаметров от осей арматуры и вдоль всего профиля трещины. на различных ступенях нагружения, координаты точек образования пространственных трещин; схемы образования и развития трещин железобетонных конструкций при кручении с изгибом.

2. Полученные опытные графики перемещений (прогибов и углов поворота) и графики деформаций бетона в окрестности расчетного сечения 1–1 позволяют оценить деформативность и жесткостные характеристики исследуемых конструкций на всех стадиях нагружения с учетом трещинообразования и дают возможность проверки разрабатываемой расчетной модели оценки сопротивления железобетонных конструкций при действии кручения с изгибом по предельным состояниям второй группы.

3. Установлено, что для железобетонных конструкций квадратного поперечного сечения из бетона В25 на начальных этапах происходило образование одной-двух пространственных трещин, из которых, по мере увеличения нагрузки выделяется прогрессирующая по ширине раскрытия, по которой и происходит разрушение. На ступенях, предшествующих разрушению, эта трещина начинает интенсивно превалировать над остальными и достигает максимальной ширины раскрытия к моменту разрушения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голышев А.Б., В.И. Колчунов. Сопротивление железобетона. К.:Основа, 2009. 432 с.

2. Бондаренко В.М., Колчунов В.И. Расчетные модели силового сопротивления железобетона. М.: ACB, 2004. 472 с.
3. Iakovenko I., Kolchunov V., Lyman I. Rigidity of reinforced concrete structures in the presence of different cracks. MATEC Web of Conferences. 6th International Scientific Conference «Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings». Transbud-2017. Kharkiv, Ukraine, April 19–21. 2017. Vol. 0216. 12 p.
4. Травуш В.И., Каприелов С.С., Конин Д.В., Крылов А.С., Чилин И.А. Экспериментальные исследования сталежелезобетонных конструкций, работающих на изгиб // Строительство и реконструкция. 2017. №4(72). С. 63-72.
5. Vishnu H. Jariwalaa, Paresh V. Patel, Sharadkumar P. Purohit. Strengthening of RC Beams subjected to Combined Torsion and Bending with GFRP Composites // Procedia Engineering. 2013. Vol. 51. Pp. 282–289.
6. 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.
7. Kolchunov V.I., Demyanov A.I., Naumov N.V. The second stage of the stress-strain state of reinforced concrete constructions under the action of torsion with bending (Theory) // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 753. Article 032056. Pp. 1-9.
8. 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.
9. Loïc B., Guilhem M., Rached F., Bruno C. Static and dynamic analysis of bending–torsion coupling of a CFRP sandwich beam // Composite Structures. 2016. Vol. 145. Pp. 26–36.
10. 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.
11. Lukina A.A., Kholopova I.S., Alpatova V.Y., Solovieva A.V. Beams with corrugated web: calculation peculiarities of bending torsion analysis // Procedia Engineering. 2016. Vol. 153. Pp. 414-418.
12. Kashani M.T., Hashemi S.M. A finite element formulation for bending-torsion coupled vibration analysis of delaminated beams under combined axial load and end moment // Shock and Vibration. 2018. Vol. 2018. Article 1348970. Pp. 1-13.
13. Колчунов В.И., Демьянов А.И. К определению напряженно-деформированного состояния стержней произвольного поперечного сечения при кручении методами сопротивления материалов // Строительство и реконструкция. 2019. №1(81). С. 10–22.
14. Kolchunov V.I., Demyanov A.I., Naumov N.V. The second stage of stressed-deformed condition of reinforced concrete structures when turning with bending (Case 2). International journal for computational civil and structural engineering. 2019. Vol. 15. No. 4. Pp 66–82.
15. 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.
16. Травуш В.И., Карпенко Н.И., Колчунов В.И., Каприелов С.С., Демьянов А.И., Конорев А.В. Результаты экспериментальных исследований конструкций квадратного и коробчатого сечений из высокопрочного бетона при кручении с изгибом // Строительство и реконструкция. 2018. №6. С. 32-43.
17. Демьянов А.И. Особенности трещинообразования в конструкциях из высокопрочного железобетона при сложном сопротивлении – кручении с изгибом // Строительство и реконструкция. 2019. №5(85). С. 3–10.

REFERENCES

1. Golyshev A.B., Kolchunov V.I. Soprotivleniye zhelezobetona [The resistance of reinforced concrete], Kiev: Basis, 2009. 432 p. (rus)
2. Bondarenko V.M., Kolchunov V.I. Raschetnye modeli silovogo soprotivleniya zhelezobetona [The computational model of a power resistance of reinforced concrete]. Moscow: ASV, 2004. 472 p. (rus)
3. Iakovenko I., Kolchunov V., Lyman I. Rigidity of reinforced concrete structures in the presence of different cracks. MATEC Web of Conferences. 6th International Scientific Conference «Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings». Transbud-2017. Kharkiv, Ukraine, April 19–21. 2017. Vol. 0216. 12 p.
4. Travush V.I., Kaprielov S.S., Konin D.V., Krylov A.S., Chilin I.A. Eksperimental'nye issledovaniya stalezhelezobetonnykh konstruksij, rabotayushhikh na izgib [Experimental studies of steel-reinforced concrete structures working on bending] // Building and Reconstruction. 2017. Vol. 4. No. 72. Pp. 63-72. (rus).
5. Vishnu H. Jariwalaa, Paresh V. Patel, Sharadkumar P. Purohit. Strengthening of RC Beams subjected to Combined Torsion and Bending with GFRP Composites // Procedia Engineering. 2013. Vol. 51. Pp. 282–289.
6. 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.

7. Kolchunov V.I., Dem'yanov A.I., Naumov N.V. The second stage of the stress-strain state of reinforced concrete constructions under the action of torsion with bending (Theory) // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 753. Article 032056. Pp. 1-9.
8. 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.
9. Loïc B., Guilhem M., Rached F., Bruno C. Static and dynamic analysis of bending–torsion coupling of a CFRP sandwich beam // Composite Structures. 2016. Vol. 145. Pp. 26–36.
10. 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.
11. Lukina A.A., Kholopova I.S., Alpatova V.Y., Solovieva A.V. Beams with corrugated web: calculation peculiarities of bending torsion analysis // Procedia Engineering. 2016. Vol. 153. Pp. 414-418.
12. Kashani M.T., Hashemi S.M. A finite element formulation for bending-torsion coupled vibration analysis of delaminated beams under combined axial load and end moment // Shock and Vibration. 2018. Vol. 2018. article 1348970. Pp. 1-13.
13. Kolchunov V.I., Dem'yanov A.I. K opredeleniyu napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya sterzhney proizvodnogo poperechnogo secheniya pri kruchenii metodami soprotivleniya materialov [To determination of stress-strain state for a rod of arbitrary cross-section under torsion using resistance of materials] // Building and Reconstruction. 2019. No.81(1), 10–22. (rus)
14. Kolchunov V.I., Dem'yanov A.I., Naumov N.V. The second stage of stressed-deformed condition of reinforced concrete structures when turning with bending (Case 2) // International journal for computational civil and structural engineering. 2019. Vol. 15. No. 4. Pp 66–82.
15. Travush V.I., Karpenko N.I., Kolchunov V.I., Kaprielov S.S., Dem'yanov A.I., Konorev A.I. Osnovnye rezul'taty eksperimental'nykh issledovaniy zhelezobetonnykh 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. 2019. No. 15(1). Pp. 51-61. (rus)
16. Travush V.I., Karpenko N.I., Kolchunov V.I., Kaprielov S.S., Dem'yanov A.I., Konorev A.V. The results of experimental studies of structures square and box sections in torsion with bending // Building and Reconstruction. 2018. No 6. Pp. 32-43. (rus)
17. Dem'yanov A.I. Osobennosti treshchinoobrazovaniya v konstrukciyah iz vysokoprochnogo zhelezobetona pri slozhnom soprotivlenii – kruchenii s izgibom [Crack formation in high-strength reinforced concrete structures at complex resistance–torsion with bending] // Building and Reconstruction. 2019. No.85(5), Pp.3–10. (rus)

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

Печенев Иван Владимирович

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Россия, аспирант.
E-mail: pecheneviv@yahoo.com

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

Dem'yanov 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

Pechenev Ivan V.

South-Western State University, Kursk, Russia, postgraduate student.
E-mail: pecheneviv@yahoo.com