

В.И. КОЛЧУНОВ, А.И. ДЕМЬЯНОВ, М.И. МАТВЕЕВ
Юго-Западный Государственный Университет, г.Курск, Россия

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ ПРИ КРУЧЕНИИ С ИЗГИБОМ

Аннотация. Приведены результаты опытных данных о сложном сопротивлении железобетонных конструкций круглого поперечного сечения из бетона В25, включающие графики прогибов и углов поворота при рассматриваемом напряженном состоянии, а также зависимости деформаций бетона, полученные по показаниям розеток тензотензорезисторов по отношению к исследуемому расчетному сечению. Экспериментально, используя предложенную схему установки тензорезисторов, определены главные деформации удлинения (и укорочения) бетона. Арматура опытных конструкций была подобрана таким образом, что в стадии, предшествующей разрушению в ней достигалась текучесть. Полученные опытные данные позволяют выполнить оценку предложенных для конструкций круглого поперечного сечения методов расчета при рассматриваемом напряженном состоянии, в частности проверку таких расчетных параметров как значения обобщенной нагрузки трещинообразования и уровня этой нагрузки 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. Испытаниями установлено, что раскрытие трещин в исследуемых конструкциях на уровне оси рабочей арматуры в два-три раза меньше чем их раскрытие на удалении полутора-двух диаметров от оси рабочей (продольной и поперечной) арматуры. Экспериментально установлены опытные параметры и картины трещин позволяют уточнить принятые рабочие гипотезы при построении расчетной модели сопротивления железобетонных конструкций круглого поперечного сечения при кручении с изгибом.

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

VI.I. KOLCHUNOV, A.I. DEMYANOV, M.I. MATVEEV
South-Western State University, Kursk, Russia

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

Abstract. The article presents the results of experimental studies of the complex stress-strain state in reinforced concrete structures with a round cross-section, made of B25 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 by an experimental method using the proposed scheme for installing strain gauges. Rebar for experimental structures was selected in such a way that it achieved yield stress in the stage before destruction. The obtained experimental data allow us to evaluate the calculation method for circular cross section structures in the considered stress state, in particular checking such calculation parameters as the values of the general load of crack appearing and the level of this load 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. The experiment found that the width 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 circular cross-section under torsion with bending.

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

1 Введение.

Расширение области применения железобетонных конструкций ведет к увеличению числа воздействий на эти конструкции и как следствие к усложнению видов напряженного состояния в таких конструкциях. Разнообразие и уникальность архитектурных форм, как правило, также способствует созданию сложного сопротивления в элементах конструкций, в частности сопротивления вызванного кручением с изгибом, что влечет за собой необходимость экспериментально-теоретических исследований. Сопротивление железобетонных конструкций при таком напряженном состоянии изучено в настоящее время недостаточно глубоко. Об этом свидетельствует известные публикации, например [1–12], а также то, что в отечественных и зарубежных нормах нормативных документах отсутствуют детальные рекомендации по проектированию конструкций при кручении с изгибом, а приведены только общие положения их расчета, да и те касаются лишь предельных состояний первой группы, касаются лишь отдельных 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. Подавляющее число научных теоретических и экспериментальных исследований по этой проблеме относится к конструкциям прямоугольного сечения [3–6, 8–12]. В то же время применение конструкций с другими формами сечений (круглые, квадратные, кольцевые, эллипсовидные) из бетонов и комбинированных материалов разной прочности [17–20] находит все большее применение, в том числе и в ответственных конструкциях зданий и сооружений, таких как ядра жесткости высотных зданий, колонны каркасов зданий, конструкции обвязочных ригелей, конструкции мостовых опор и др. В этой связи проведение новых исследований и особенно экспериментальных исследований по установлению особенностей деформирования трещинообразования и разрушения железобетонных конструкций при кручении с изгибом с новыми формами сечений представляет актуальную задачу. В рассматриваемой статье представлены некоторые результаты экспериментальных исследований жесткости и трещиностойкости железобетонных балок круглого 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. Однако отсутствие опытных данных о деформациях, схемах трещинообразования, количественных значениях раскрытия трещин для конструкций круглого поперечного сечения не позволяют обобщить и верифицировать этот метод на расчет такого типа конструкций. Для того чтобы проверить достоверность предлагаемого расчетного аппарата для железобетонных конструкций круглого поперечного сечения и установить закономерности и особенности их сопротивления при кручении с изгибом были проведены экспериментальные исследования по специально разработанной методике позволяющие опытным путем установить ряд новых параметров заложенных в расчетной модели. Армирование, характеристики и маркировка опытных кон-

струкций, а также методика их испытаний приведена в работах [14, 15].

Полученные опытные данные и их анализ позволяют отметить следующее. Характерной особенностью трещинообразования в конструкциях круглого 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 нескольких трещин (рисунок 1). До момента разрушения в конструкции, как правило, образуется два-три уровня трещин. При дальнейшем увеличении нагрузок из образовавшихся трещин выделяется одна та, которая впоследствии и является разрушающей. Эта трещина на ступенях близких к разрушению начинает превалировать по раскрытию над остальными и к моменту разрушения имеет максимальную ширину раскрытия.

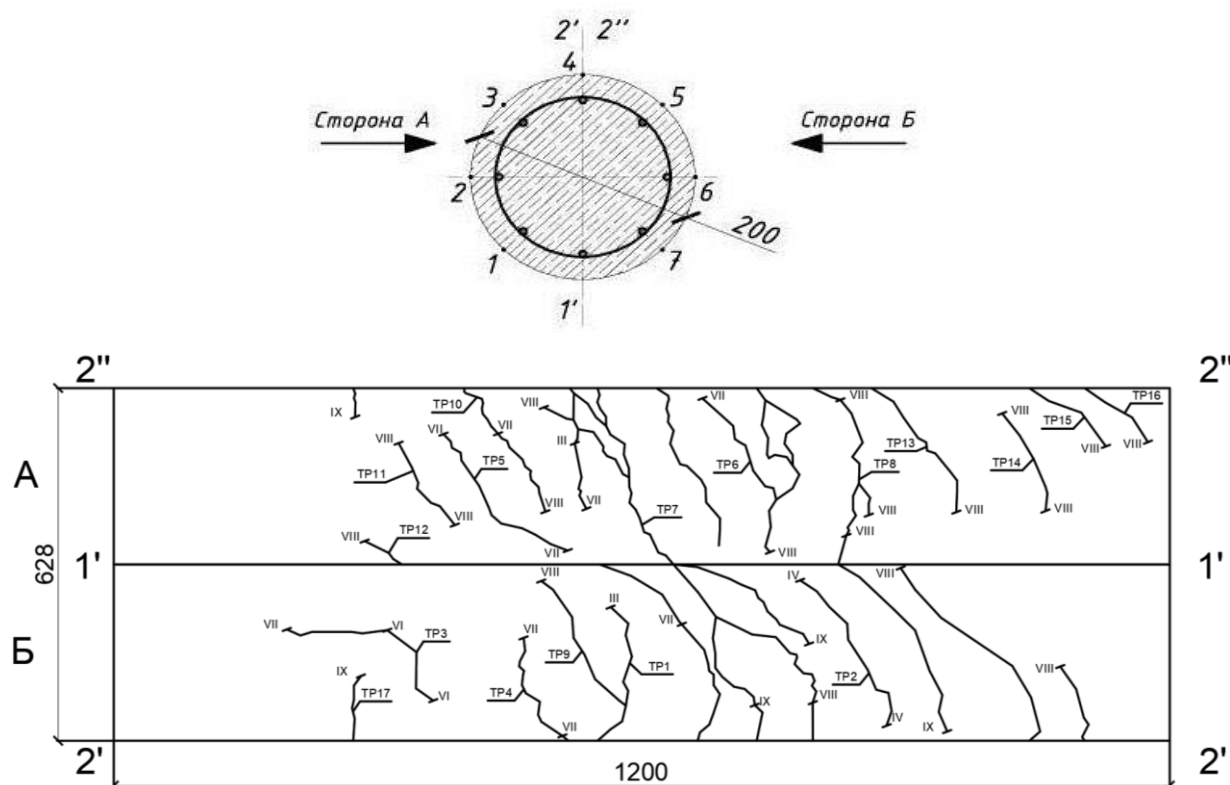


Рисунок 1 – Картина трещинообразования в экспериментальной опытной конструкции Б-КР-720 (1)

Уместно также отметить, что по мере увеличения этапов нагружения количество трещин увеличивалось. При этом новые трещины образовывались на конкретном уровне нагружения образовывались в промежутках расстояний между уже образовывшихся трещин на предыдущих этапах нагружения, т.е. трещинообразование носило уровневый характер [1, 2].

Испытания каждой экспериментальной конструкции сопровождались специальным ведением 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 так же 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 приведе-

ны 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 следующее. Уровень нагрузки трещинообразования в опытных конструкциях балок Б-КР-720 (1) составил порядка 0.6 от разрушающей нагрузки и 0.52 - в балках Б-КР-720 (2). 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-КР-720 (1)

Круглого поперечного сечения можно видеть, что после образования трещин падение изгибной жесткости конструкции происходит более интенсивно чем жесткости конструкции на кручение. Связано это, по-видимому, с проявлением сил нагельного эффекта и сил зацепления в пространственной брешине.

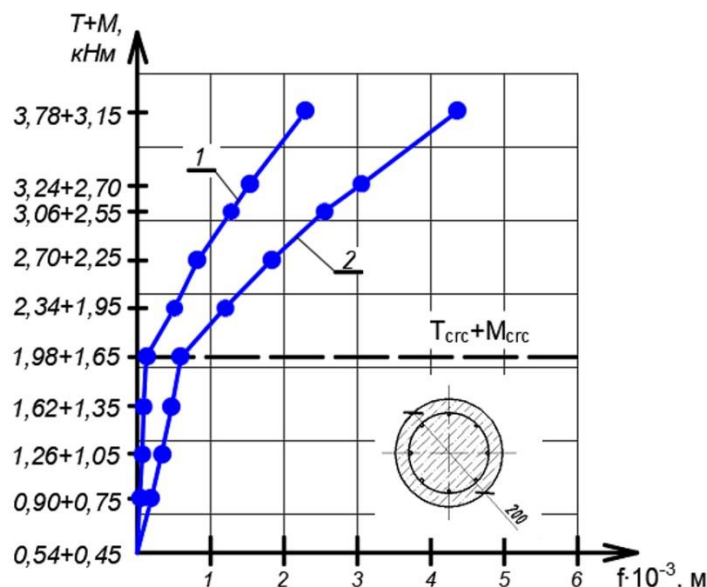


Рисунок 2 – Графики прогибов опытной конструкции Б-КР-720 (1):
1 – прогиб по индикатору И2; 2 – прогиб по индикатору И3

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

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

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

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

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

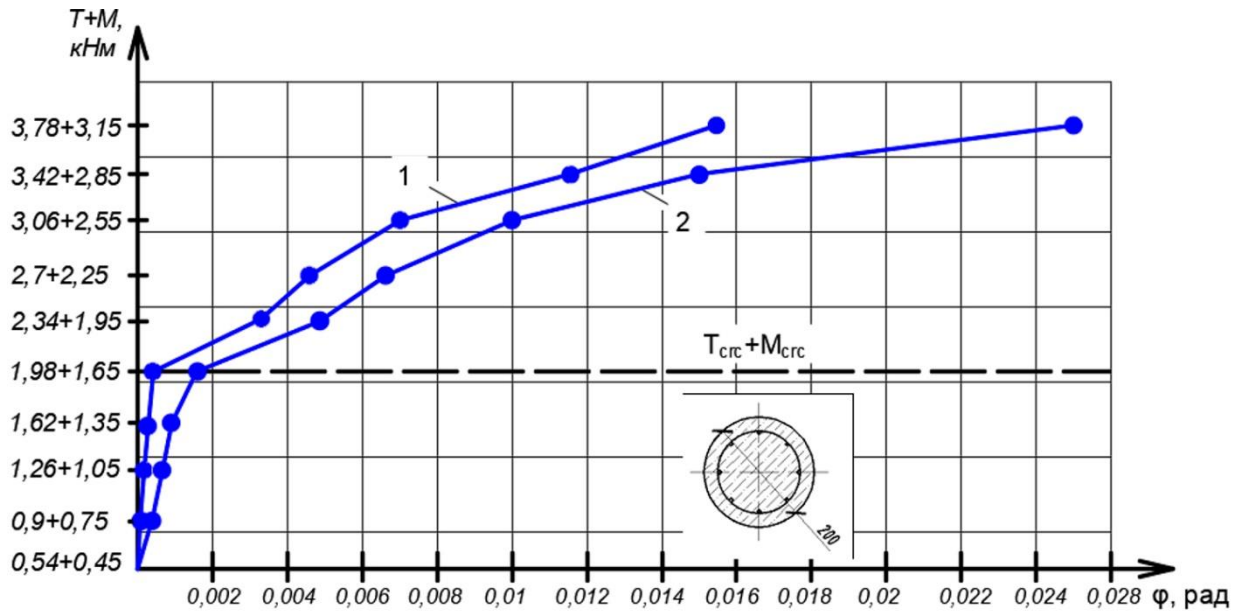


Рисунок 3 – Графики углов поворота опытной конструкции Б-КР-720 (1):
1 – угол поворота по индикаторам И1-И2; 2 – угол поворота по индикаторам И3-И4

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

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

$$\varepsilon_1 = \frac{1188 + (-570)}{2} + \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(1188 - (-1462))^2 + ((-1462) - (-570))^2} = 2280,2,$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1188 + (-570)}{2} - \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(1188 - (-1462))^2 + ((-1462) - (-570))^2} = -1662,2,$$

$$\operatorname{tg} 2\varphi = \frac{2(-1462) - (1188 + (-570))}{1188 - (-570)} = -2,01 (32,7^\circ).$$

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

$$\varepsilon_1 = \frac{434 + (-242)}{2} + \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(434 - (-529))^2 + ((-529) - (-242))^2} = 804,4,$$

$$\varepsilon_2 = \frac{434 + (-242)}{2} - \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(434 - (-529))^2 + ((-529) - (-242))^2} = -612,4,$$

$$\operatorname{tg} 2\varphi = \frac{2(-529) - (434 + (-242))}{434 - (-242)} = -1,85 (31,2^\circ).$$

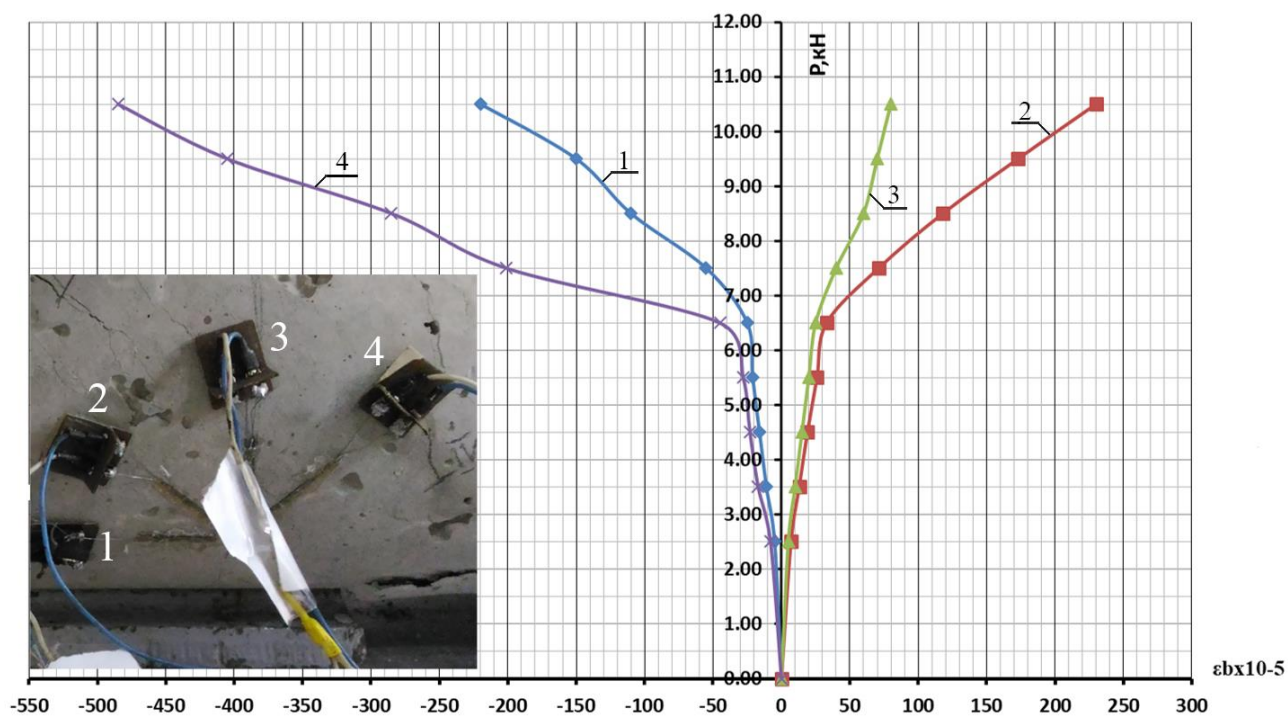


Рисунок 4 – Графики зависимости деформаций бетона от нагрузки для опытной конструкции Б-КР-720(1), сторона А: 1,2,3,4-соответственно, по тензорезисторам 1-4

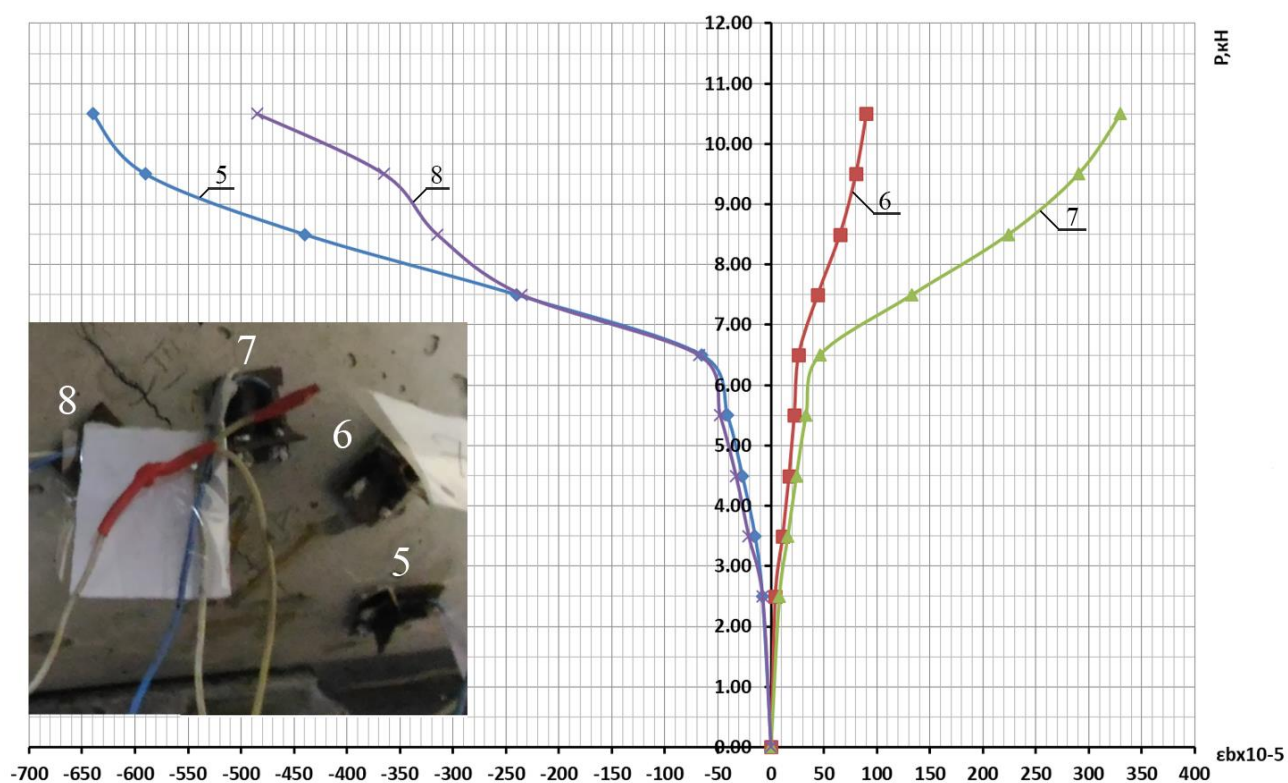


Рисунок 5 – Графики зависимости деформаций бетона от нагрузки для опытной конструкции Б-КР-720(1), сторона

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

$$\varepsilon_1 = \frac{98 + (-132)}{2} + \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(98 - (-135))^2 + ((-135) - 98)^2} = 215.3;$$

$$; \varepsilon_2 = \frac{98 + (-132)}{2} - \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(98 - (-135))^2 + ((-135) - 98)^2} = -249.3$$

$$\operatorname{tg} 2\varphi = \frac{2(-135) - (98 + (-132))}{98 - (-132)} = 1,03(23\text{град}).$$

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

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

$$\varepsilon_1 = \frac{-925 + (-705)}{2} + \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{((-925) - 2235)^2 + (2235 - (-705))^2} = 2227.9;$$

$$\varepsilon_2 = \frac{-925 + (-705)}{2} - \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{((-925) - 2235)^2 + (2235 - (-705))^2} = -3857.9;$$

$$\operatorname{tg} 2\varphi = \frac{2 \cdot 2235 - ((-925) + (-705))}{925 - (-705)} = 3,74(38\text{град}).$$

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

$$\varepsilon_1 = \frac{-503 + (-295)}{2} + \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{((-503) - 1268)^2 + (1268 - (-295))^2} = 1025.6 ;$$

$$\varepsilon_2 = \frac{-503 + (-295)}{2} - \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{((-503) - 1268)^2 + (1268 - (-295))^2} = -1823.6 ;$$

$$\operatorname{tg} 2\varphi = \frac{2 \cdot 1268 - ((-503) + (-295))}{-503 - (-295)} = -16,03(43\text{град}).$$

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

$$\varepsilon_1 = \frac{-137 + (-115)}{2} + \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{((-137) - 98)^2 + (98 - (-115))^2} = 97.6 ;$$

$$\varepsilon_2 = \frac{-137 + (-115)}{2} - \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{((-137) - 98)^2 + (98 - (-115))^2} = -349.6 ;$$

$$\operatorname{tg} 2\varphi = \frac{2 \cdot 98 - ((-137) + (-115))}{-137 - (-115)} = -20,4(44\text{град}).$$

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; обо-

щенная нагрузка трещинообразования $R_{sup,crc}$ и разрушения $R_{sup,u}$ 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).

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

Шифр кон- струкции	$R_{sup,crc},$ кН	$R_{sup,max},$ кН	$P_{max},$ кН	Степень нагружения , P_i/P_{max}	Пространственная тре- щина, по которой про- изошло разрушение			Факти- че-ская высота сжатой зоны, $x_{fact},$ мм	Координаты образования простран- ственной 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-КР-720 (1) Сторона А	3.25	5.25	10.5	0.62	—	—	255	—	- 81.3	- 12.5
				0.81	2	5		12		
				1	18	16		0		
Б-КР-720 (1) Сторона Б				0.62	—	—		—	174.7	33.9
				0.81	4	6		42		
				1	12	16		0		
Б-КР-720 (2) Сторона А	2.75	5.25	10.5	0.62	—	—	279	—	- 84.8	- 14.3
				0.81	2	5		48		
				1	5	8		12		
Б-КР-720 (2) Сторона Б				0.62	—	—		—	194.1	43.6
				0.81	4	7		22		
				1	10	12		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. Экспериментальными исследованиями железобетонных конструкций круглого поперечного сечения получены новые опытные данные о сложном напряженно-деформированном состоянии в сечениях таких конструкций в исследуемых при действии изгибающего и крутящего моментов, 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 деформативности и жесткостные характеристики исследуемых конструкций на всех стадиях нагружения с учетом трещинообразования и дают возможность проверки раз-

рабатываемой расчетной модели оценки сопротивления железобетонных конструкций при действии кручения с изгибом по предельным состояниям второй группы.

3. Установлено, что для железобетонных конструкций круглого поперечного сечения из бетона В25 на начальных этапах образовывалось несколько пространственных трещин, из которых, по мере увеличения нагрузки выделяется одна прогрессирующая по ширине раскрытия, по которой и происходит разрушение. На ступенях, предшествующих разрушению, эта трещина начинает интенсивно превалировать над остальными и имеет максимальную ширину раскрытия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голышев А. Б. Сопротивление железобетона / А. Б. Голышев, В. И. Колчунов. – К.: Основа, 2009. – 432 с.
2. Бондаренко В.М. Расчетные модели силового сопротивления железобетона. / В.М. Бондаренко, В.И. Колчунов. – М.: АСВ, 2004. – 472 с.
3. Iakovenko I., Kolchunov V., Lyar I. (2017). 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. Demyanov A., Kolchunov V. (2017). The dynamic loading in longitudinal and transverse reinforcement at instant emergence of the spatial crack in reinforced concrete element under the action of a torsion with bending. Journal of Applied Engineering Science, vol. 15(2017)3, article 456, pp. 375–380. doi:10.5937/jaes15-14663
5. Vishnu H. Jariwala, 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. V. I. Kolchunov, A. I. Dem'yanov, N. V. Naumov. 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 Вл. 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. Prakash Shanmugam, Suriya & Li, Qian & Belarbi, Abdeldjelil. Behavior of Circular and Square Reinforced Concrete Bridge Columns under Combined Loading Including Torsion. ACI Structural Journal. 2012. Vol. 109. Pp. 317-327.
18. Awadh E.A. Torsion plus bending and shear on reinforced concrete beams. Journal of Engineering and Sustainable Development. 2016. No.4. P. 277– 288.

19. Ilker Kalkan, Saruhan Kartal. Torsional Rigidities of Reinforced Concrete Beams Subjected to Elastic Lateral Torsional Buckling. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*. 2017. Vol. 11 No.7. Pp. 969–972.
20. Amin, A, Bentz, E.C. Strength of steel fiber reinforced concrete beams in pure torsion. *Structural Concrete*. 2018. No.19. Pp. 684– 694

REFERENCES

1. Golyshev A. B. *Soprotivleniye zhelezobetona* [The resistance of reinforced concrete], Kiev: Basis, 2009. 432 p. (rus)
2. Bondarenko V.M. *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., Lymar 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. Iakovenko I., Kolchunov V.I. The development of fracture mechanics hypotheses applicable to the calculation of reinforced concrete structures for the second group of limit states. *Journal of Applied Engineering Science*, vol. 15(2017)3, article 455, pp. 366–375. doi:10.5937/jaes15-14662
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. Rahal K. N. & Collins M. P. (2006) Compatibility Torsion in Spandrel Beams Using Modified Compression Field Theory // *ACI Structural Journal*. 103(3), 328–338.
7. Demyanov A. I. & Kolchunov V.I. (2018) To the approximation of rectangular and complex cross-sections of reinforced concrete structures under the action torsion with bending. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 456, 012104, 1–12. Doi:10.1088/1757-899X/456/1/012104
8. David A. E., Thomas L. H., Simon A. N. & Jonathan E. C. (2018) Veering and nonlinear interactions of a clamped beam in bending and torsion. *Journal of Sound and Vibration*. 416, 1–16.
9. Loïc B., Guilhem M., Rached F. & Bruno C. (2016) Static and dynamic analysis of bending–torsion coupling of a CFRP sandwich beam. *Composite Structures*. 145, 26–36. Doi: 10.1016/j.compstruct.2016.02.055
10. Ogawa Y., Kawasaki Y. & Okamoto T. (2014) Fracture behavior of RC members subjected to bending shear and torsion using acoustic emission method. *Construction and Building Materials*. 67, 165–169. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.05.100
11. Lukina A. A., Kholopova I. S., Alpatova V. Y. & Solovieva A. V. (2016) Beams with corrugated web: calculation peculiarities of bending torsion analysis. *Procedia Engineering*. 153, 414–418. Doi: 10.1016/j.proeng.2016.08.143
12. Kashani M. T. & Hashemi S. M. (2018) A finite element formulation for bending-torsion coupled vibration analysis of delaminated beams under combined axial load and end moment. *Shock and Vibration*. 2018, 1348970, 1–13.
13. Kolchunov V.I. & Demyanov A. I. (2019) K opredeleniyu napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya sterzhney proizvol'nogo 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]. *Buildings and Reconstruction*. 81(1), 10–22. (rus)
14. Murashev V. I. (1950) *Treshchinoustoychivost, zhestkost i prochnost zhelezobetona* [Crack resistance, stiffness and strength of reinforced concrete]. Moscow: Mashstroyizdat Publ., 268. (rus)
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*, 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. Prakash Shanmugam, Suriya & Li, Qian & Belarbi, Abdeldjelil. Behavior of Circular and Square Reinforced Concrete Bridge Columns under Combined Loading Including Torsion. *ACI Structural Journal*. 2012. Vol. 109. Pp. 317–327.
18. Awadh E.A. Torsion plus bending and shear on reinforced concrete beams. *Journal of Engineering and Sustainable Development*. 2016. No.4. P. 277– 288.

19. Ilker Kalkan, Saruhan Kartal. Torsional Rigidities of Reinforced Concrete Beams Subjected to Elastic Lateral Torsional Buckling. International Journal of Civil and Environmental Engineering. 2017. Vol. 11 No.7. Pp. 969–972.

20. Amin, A, Bentz, E.C. Strength of steel fiber reinforced concrete beams in pure torsion. Structural Concrete. 2018. No.19. Pp. 684– 694

Информация об авторах

Колчунов Владимир Иванович

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск

Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры уникальные здания и сооружения

E-mail: vlik52@mail.ru

Демьянов Алексей Иванович

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск

канд. техн. наук, доцент

E-mail: speccompany@gmail.com

Матвеев Максим Игоревич

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск

Аспирант кафедры уникальных зданий и сооружений

E-mail: vlik52@mail.ru

Information about authors

Kolchunov Vladimir I.

South-Western State University, Kursk

Doctor in Technical Sciences, Professor, Professor, Department of unique building and structures

E-mail: vlik52@mail.ru

Demyanov Aleksey I.

South-West State University, Kursk, Russia,

Candidate in Technical Science, Docent, Associated Professor, Department of unique building and structures

E-mail: speccompany@gmail.com

Matveev Maksim I.

South-Western State University, Kursk

Postgraduate student, Department of unique building and structures

E-mail: vlik52@mail.ru