

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 624.012.45

DOI: 10.22363/1815-5235-2019-15-1-51-61

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Основные результаты экспериментальных исследований железобетонных конструкций из высокопрочного бетона В100 круглого и кольцевого сечений при кручении с изгибом**В.И. Травуш¹, Н.И. Карпенко², Вл.И. Колчунов^{3*},
С.С. Каприелов⁴, А.И. Демьянов³, А.В. Конорев³**¹Российская академия архитектуры и строительных наук
Российская Федерация, 107031, Москва ул. Большая Дмитровка, д. 24, стр. 1²Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН
Российская Федерация, 127238, Москва, Локомотивный проезд, 21³Юго-Западный государственный университет
Российская Федерация, 305040, Курск, ул. 50 лет Октября, 94⁴Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона имени А.А. Гвоздева
Российская Федерация, 109428, Москва, ул. 2-я Институтская, д. 6, корп. 5

*vlik52@mail.ru

(поступила в редакцию: 22 ноября 2018 г.; доработана: 19 декабря 2018 г.; принята к публикации: 18 января 2019 г.)

Цель исследования – проверка экспериментальным путем предлагаемого в статье расчетного аппарата и накопление новых опытных данных о сложном сопротивлении железобетонных конструкций из высокопрочного бетона кольцевого и круглого поперечных сечений на испытательной базе Юго-Западного государственного университета.

Метод исследований – экспериментально-теоретический.

Результаты. По итогам проделанной работы построены графики прогибов и углов поворота, зависимостей деформаций бетона по показаниям розеток электротензорезисторов по отношению к расчетному сечению 1–1. Определены главные деформации удлинения и укорочения бетона; арматура была подобрана таким образом, что в стадии, предшествующей разрушению, она достигала текучести, поэтому напряжения в арматуре известны. Установлено, что для железобетонных конструкций из высокопрочного бетона круглого сечения, как правило, наблюдается развитие двух трещин, т. е. круглая форма поперечного сечения несколько снижает концентрацию, обусловленную структурой высокопрочного бетона. Для кольцевого сечения имело место несколько трещин, но особо выделяется та, по которой происходит разрушение. На ступенях, предшествующих разрушению, эта трещина начинает превалировать над остальными и имеет максимальную ширину раскрытия. На основании экспериментальных исследований железобетонных конструкций из высокопрочного бетона круглого и кольцевого сечений получены достоверные данные о сложном напряженно-деформированном состоянии в исследуемых областях сопротивления, такие как: значения обобщенной нагрузки трещинообразования $R_{sup,crc}$ и разрушения $R_{sup,u}$, ее уровень относительно предельной нагрузки; расстояние между трещинами на разных уровнях трещинообразования (до момента разрушения, как правило, образуется два-три уровня); ширина раскрытия трещин на уровне оси рабочей арматуры, на удалении 2 диаметров от осей арматуры и вдоль всего профиля трещины на различных ступенях нагружения, из которых следует, что раскрытие трещин на уровне оси арматуры в 2–3 раза меньше, по сравнению с раскрытием трещин на удалении 1,5–2 диаметров от оси рабочей (продольной и поперечной) арматуры; координаты точек (x ; y ; z) образования пространственных трещин; схемы зарисовки на планшетах образования, развития и раскрытия трещин железобетонных конструкций при кручении с изгибом. Таким образом, выполненные экспериментальные исследования и полученный результат предоставляют возможность проверки разрабатываемой расчетной модели и ее рабочих гипотез оценки сопротивления железобетонных конструкций из высокопрочного бетона при кручении с изгибом.

Ключевые слова: железобетонные конструкции, высокопрочный бетон, кручение с изгибом, результаты эксперимента

© Травуш В.И., Карпенко Н.И., Колчунов Вл.И., Каприелов С.С., Демьянов А.И., Конорев А.В., 2018



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

Решение основных задач капитального строительства связано с дальнейшим развитием технического прогресса в области бетона и железобетона как наиболее распространенных материалов несущих конструкций современного строительства.

Разнообразие и уникальность архитектурных форм, как правило, вызывает сложное сопротивление железобетонных конструкций – кручение с изгибом и требует создания бетонов все более высоких классов, что влечет за собой необходимость экспериментально-теоретических исследований [1–14].

Сопротивление железобетонных конструкций на кручение с изгибом в настоящее время изучено недостаточно глубоко и практически не изучено для высокопрочных бетонов. Об этом свидетельствует и тот факт, что в СП 63.13330.2012¹ отсутствуют какие-либо рекомендации по проектированию конструкций при кручении с изгибом, а приведены только общие положения их расчета, которые не всегда согласуются с реальной работой железобетона в стадии образования, развития трещин, а также в предельной стадии их сопротивления.

Результаты исследований и их анализ

Для того чтобы проверить достоверность предлагаемого расчетного аппарата и установить закономерности сопротивления железобетонных конструкций при кручении с изгибом были проведены экспериментальные исследования по специально разработанной методике.

Фактическое образование и развитие трещин при проведении испытаний опытных железобетонных конструкций круглого и кольцевого поперечных сечений при кручении с изгибом представлены на рис. 1.

Картины развития трещин для круглых и кольцевых сечений приведены на рис. 2 и 3.

Характерной особенностью железобетонных конструкций круглого и кольцевого сечений яв-

ляется то, что происходит образование нескольких трещин, из них выделяется та, которая впоследствии и является разрушающей. Эта трещина на ступенях близких к разрушению начинает превалировать над остальными и имеет максимальную ширину раскрытия (рис. 2, 3).

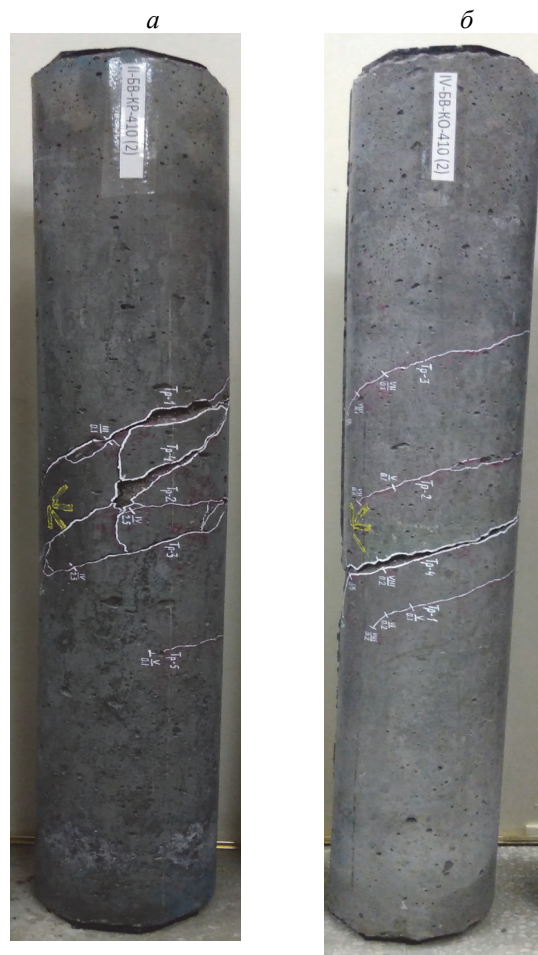


Рис. 1. Картина образования и развития трещин при проведении испытаний железобетонных конструкций на кручение с изгибом, сторона Б:
 а – II-БВ-КР-410 (2); б – IV-БВ-КО-410 (2)
[Figure 1. The picture of formation and development of cracks during testing of reinforced concrete structures for torsion with bending, side Б:
 а – II-БВ-КР-410 (2); б – IV-БВ-КО-410 (2)]

Опытные исследования каждой экспериментальной конструкции сопровождались ведением журнала испытаний. Полученные данные приведены в таблице. Графики деформаций (прогибов и углов поворота) по отношению к расчетному сечению 1–1 приведены на рис. 4.

¹ СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. М.: Министерство регионального развития РФ, 2012. 156 с.

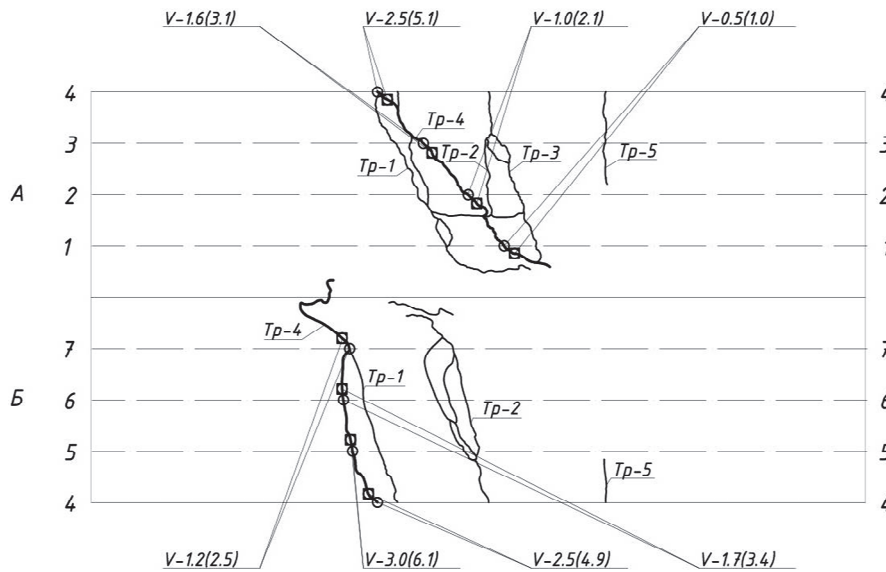


Рис. 2. Раскрытие трещин в экспериментальной железобетонной конструкции второй серии II-БВ-КР-410 (2):
 без скобок приведены значения ширины раскрытия трещин, замеренные вдоль оси рабочей арматуры,
 в скобках – то же на удалении двух диаметров от оси рабочей арматуры
[Figure 2. Crack opening in the experimental reinforced concrete structure of the second series II-БВ-КР-410 (2):
 without brackets – the values of crack opening width measured along the axis of the working rebar are given,
 in brackets – the same at a distance of two diameters from the axis of the working rebar]

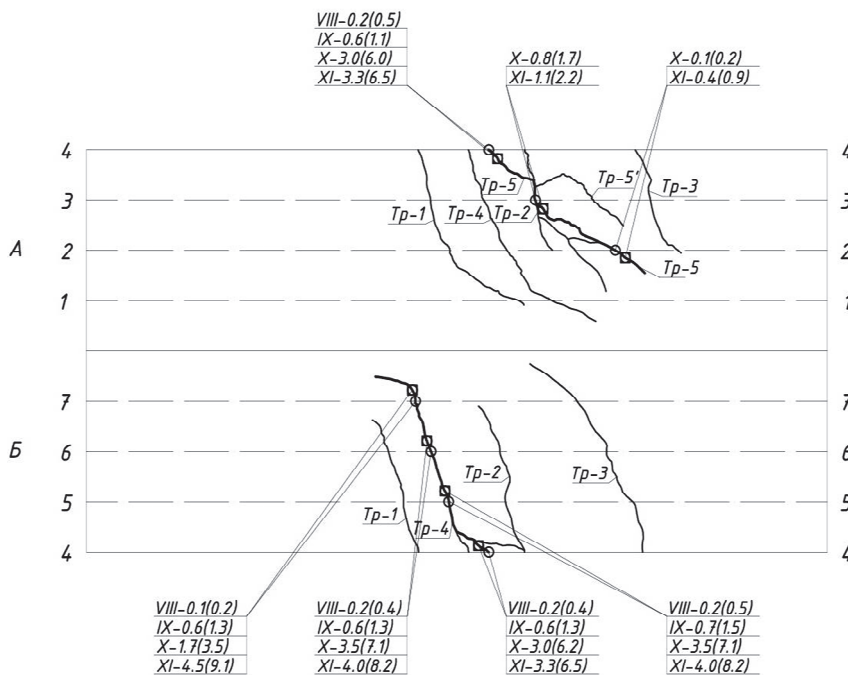


Рис. 3. Раскрытие трещин в экспериментальной железобетонной конструкции четвертой серии IV-БВ-КО-410 (2):
 без скобок приведены значения ширины раскрытия трещин, замеренные вдоль оси рабочей арматуры,
 в скобках – то же на удалении 2 диаметров от оси рабочей арматуры
[Figure 3. Crack opening in the experimental reinforced concrete structure of the second series IV-БВ-КО-410 (2):
 without brackets – the values of crack opening width measured along the axis of the working rebar are given,
 in brackets – the same at a distance of two diameters from the axis of the working rebar]

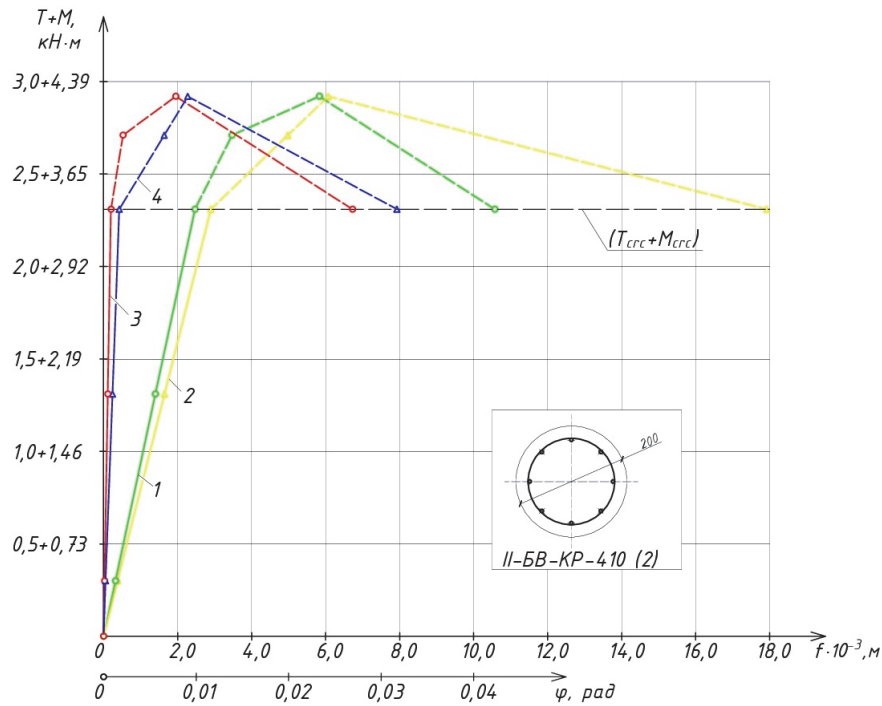


Рис. 4. Графики углов поворота и прогибов опытной железобетонной конструкции IV-БВ-КО-410 (2):
 1 – прогиб по индикатору И2; 2 – прогиб по индикатору И3; 3 – угол поворота по индикаторам И1-И2; 4 – угол поворота по индикаторам И3-И4
[Figure 4. Graphs of rotation angles and deflections of the experimental reinforced concrete structure:
 1 – deflection on the indicator И2; 2 – deflection on the indicator И3; 3 – angle of rotation on the indicators И1-И2; 4 – angle of rotation on the indicators И3-И4]

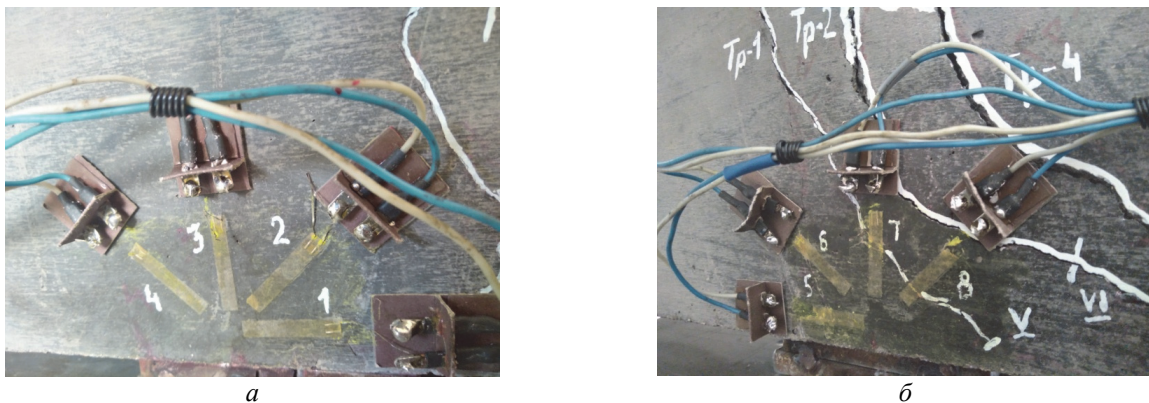


Рис. 5. Схема развития трещин по отношению к розеткам электротензорезисторов для опытной железобетонной конструкции III-БВ-КОР-410 (3) на стадии, предшествующей разрушению: а – сторона А; б – сторона Б
[Figure 5. Scheme of cracks' development in relation to electrical resistor sockets for experimental reinforced concrete structure III-BB-KOP-410 (3) at the stage preceding destruction: а – side A; б – side B]

Таким образом, выполнены экспериментальные исследования железобетонных конструкций из высокопрочного бетона при кручении с изгибом с целью проверки предлагаемого метода расчета и выявления закономерностей и параметров сопротивления железобетонных конструкций при кручении с изгибом, таких как координаты образования пространственных трещин, обобщенная нагрузка трещинообразования $R_{sup,crs}$, ширина раскрытия трещин на уровне оси продольной и поперечной растянутой арматуры вдоль всего профиля трещин; изме-

нения расстояния между трещинами l_{crs} и длины трещин h_{crs} по мере увеличения деформационной нагрузки; деформаций сжатого бетона (см. таблицу) при сложном напряженно-деформированном состоянии и др. Для анализа в работе представлены графики деформаций, полученные по показаниям электротензометрических розеток (рис. 5–7).

В результате проведенных опытов по установленным розеткам электротензорезисторов также были построены графики «нагрузка – относительная деформация». Для опытных железобетонных конструкций II-БВ-КР-410 (2) и IV-БВ-КО-410 (2)

такие графики приведены на рис. 6 и 7 соответственно.

Розетки электротензорезисторов обрабатывались в соответствии с формулой для определения главных деформаций удлинения (укорочения) бетона.

7 этап:

$$\varepsilon_1 = \frac{(-115) + (-27)}{2} + \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{((-115) - (-114))^2 + ((-114) - (-27))^2} = -10; \quad (1)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{(-115) + (-27)}{2} - \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{((-115) - (-114))^2 + ((-114) - (-27))^2} = -132; \quad (2)$$

$$\operatorname{tg} 2\varphi = \frac{2(-114) - ((-115) + (-27))}{(-115) - (-27)} = 0,97; \quad (\varphi = 27^\circ). \quad (3)$$

6 этап:

$$\varepsilon_1 = \frac{(-90) + (-25)}{2} + \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{((-90) - (-100))^2 + ((-100) - (-25))^2} = -4; \quad (4)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{(-90) + (-25)}{2} - \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{((-90) - (-100))^2 + ((-100) - (-25))^2} = -110,9; \quad (5)$$

$$\operatorname{tg} 2\varphi = \frac{2(-100) - ((-90) + (-25))}{(-90) - (-25)} = 1,3; \quad (\varphi = 33^\circ). \quad (6)$$

Для обработки показаний электротензорезисторов использовались формулы определения главных деформаций удлинения (укорочения) бетона.

Применительно к П-БВ-КР-410 (3), сторона Б, (рис. 6) получим:

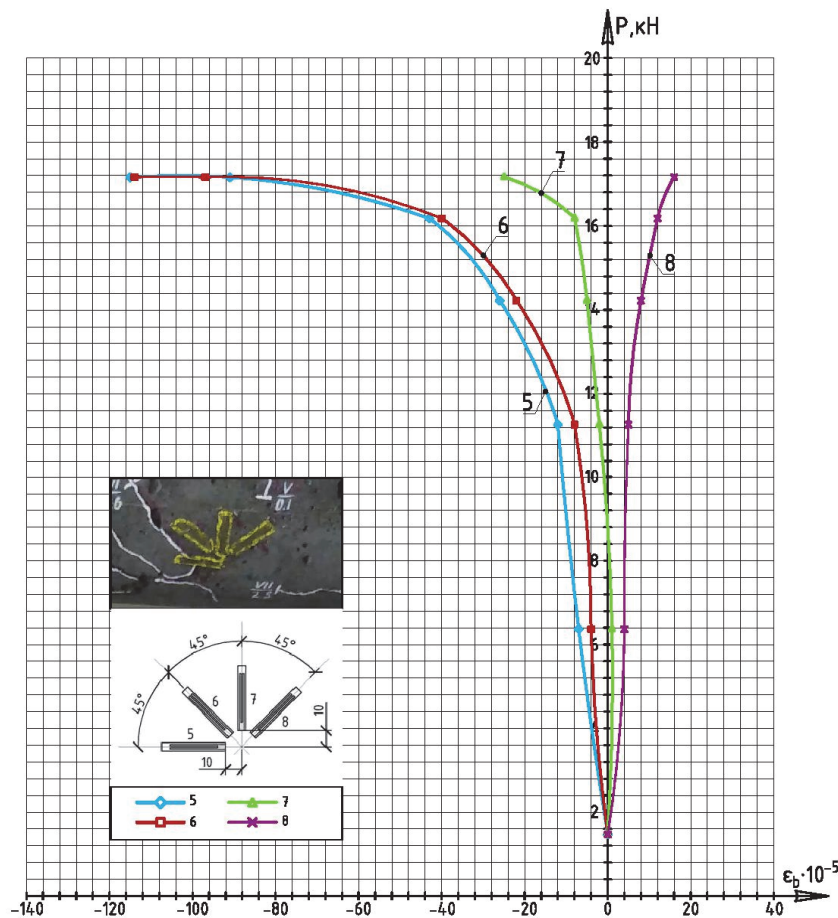


Рис. 6. Графики зависимости деформаций бетона от нагрузки для железобетонной конструкции П-БВ-КР-410 (3)
[Figure 6. The dependence of deformation of concrete load for reinforced concrete structure П-БВ-КР-410 (3)]

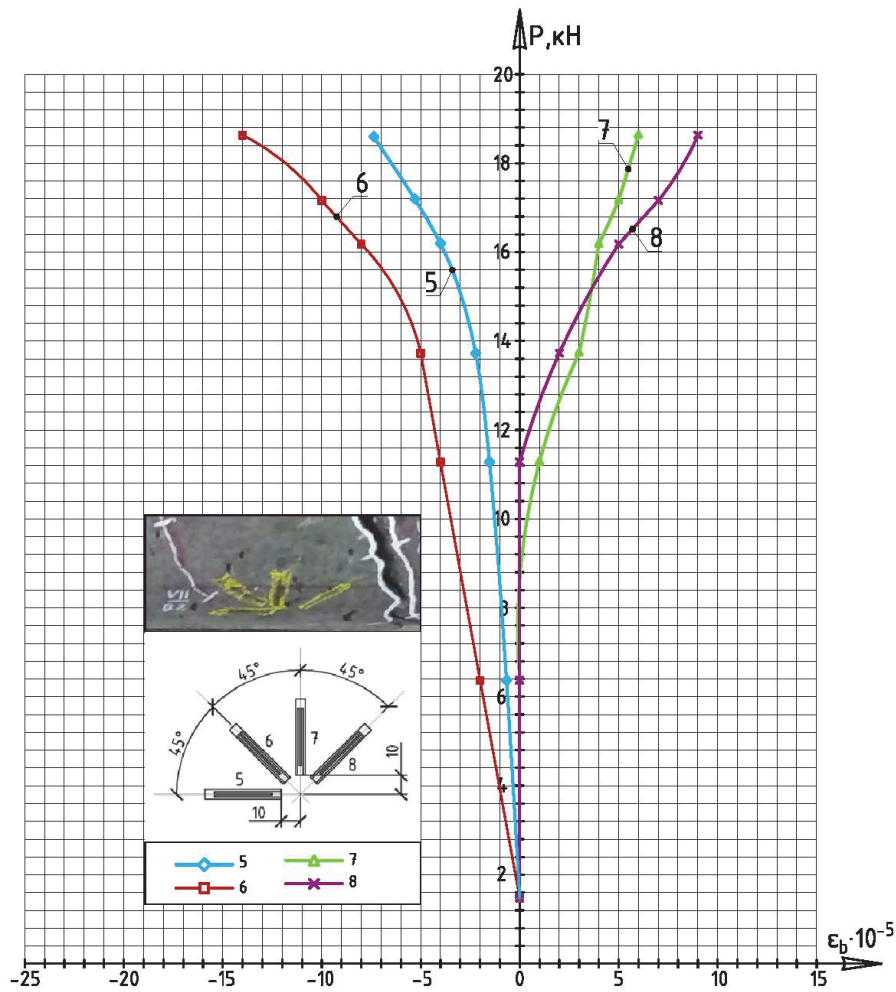


Рис. 7. Графики зависимости деформаций бетона от нагрузки для железобетонной конструкции
 [Figure 7. The dependence of deformation of concrete load for reinforced concrete structure IV-БВ-КО-410 (2)]

Применительно к IV-БВ-КО-410 (2), сторона Б, (рис. 7) получим:

7 этап:

$$\varepsilon_1 = \frac{(-7) + (-15)}{2} + \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{((-7) - (-15))^2 + ((-15) - (-5,5))^2} = 4,5; \quad (7)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{(-7) + (-15)}{2} - \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{((-7) - (-15))^2 + ((-15) - (-5,5))^2} = -26,5; \quad (8)$$

$$\operatorname{tg} 2\varphi = \frac{2(-5,5) - ((-7) + (-15))}{(-7) - (-15)} = 0,86; \quad (\varphi = 24^\circ). \quad (9)$$

6 этап:

$$\varepsilon_1 = \frac{(-6) + (-5)}{2} + \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{((-6) - (-10))^2 + ((-10) - (-5))^2} = 15; \quad (10)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{(-6) + (-5)}{2} - \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{((-6) - (-10))^2 + ((-10) - (-5))^2} = -16; \quad (11)$$

$$\operatorname{tg} 2\varphi = \frac{2(-10) - ((-6) + (-5))}{(-6) + (-5)} = 1,9; \quad (\varphi = 44^\circ). \quad (12)$$

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования железобетонных конструкций из высокопрочного бетона при кручении с изгибом позволили проверить разработанную расчетную модель, ее рабочие предпосылки и выявить закономерности и параметры сопротивления железобетонных конструкций, такие как координаты образования пространственных трещин; обобщенная 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).

Также были определены фактическая высота сжатой зоны x_{fact} и высота сжатого бетона над наклонной трещиной x_b в рабочем сечении 1–1 (проходящем через конец пространственной трещины); прогибы и углы поворота; значение проекций пространственных трещин на горизонталь.

В итоге данные, полученные в результате экспериментов, предоставляют возможность проверить достоверность расчетного аппарата сложного сопротивления железобетонных конструкций из высокопрочного бетона при совместном действии кручения с изгибом.

Таблица

Экспериментальные параметры сопротивления железобетонных конструкций серий II и IV при кручении с изгибом
[Table. Experimental parameters of resistance of reinforced concrete structures of series II and IV at torsion with bending]

Серия [Series]	Шифр конструкции [Cipher design]	$R_{sup,crc}$, кН [$R_{sup,crc}$, kN]	$R_{sup,max}$, кН [$R_{sup,max}$, kN]	P_{max} , кН [P_{max} , kN]	Степень нагрузки, P/P_{max} [Loading stage, P/P_{max}]	Пространственная трещина, по которой произошло разрушение [Spatial crack, which was the destruction]			Фактиче- ская высо- та сжатой зоны, x_{fact} , мм [Actual height of the com- pressed zone, x_{fact} , mm]	Координаты образования пространствен- ной трещины [Coordinates of the spatial formation of cracks]	
						$a_{crc,1}$, мм [$a_{crc,1}$ mm]	$a_{crc,2}$, мм [$a_{crc,2}$ mm]	$l_{crc,max}$, мм [$l_{crc,max}$, mm]		x_{exp} , мм	y_{exp} , мм
II	БВ-КР-410 (2) Сторона А [Side A]	6,62	7,11	14,22	0,79	2,5	1,0	385	0	111,1	-35,4
	БВ-КР-410 (2) Сторона Б [Side B]				0,79	2,5	1,7		0	-274,4	-47,3
IV	БВ-КО-410 (2) Сторона А [Side A]	7,61	9,57	19,13	0,85	0,2	0,1	436	–	264,4	-1,6
					0,90	0,6	0,3		–		
					0,95	3,0	0,6		75		
					1,00	3,3	1,4		50		
	БВ-КО-410 (2) Сторона Б [Side B]				0,85	0,2	0,2		60	-53,5	-11,6
					0,90	0,6	0,6		10		
					0,95	3,0	3,5		10		
					1,00	3,3	4,0		0		

Примечание: $a_{crc,1}$ – ширина раскрытия трещины на уровне оси растянутой рабочей арматуры, мм; $a_{crc,2}$ – ширина раскрытия трещины на уровне середины высоты сечения, мм; $l_{crc,max}$ – длина проекции пространственной трещины, мм; x_{exp} – расстояние по горизонтали от опорной реакции, мм; y_{exp} – расстояние по вертикали от геометрической оси, мм

Для II-БВ-КР-410 (2). Образование трещины Тр-4, переходящей в трещину Тр-3 на грани А и пересекающей трещину Тр-1 на верхней грани. Также образовалась нитевидная трещина Тр-5. Произошло дальнейшее увеличение ширины рас-

крытия и рост по высоте сечения трещин Тр-1, Тр-3, Тр-4. На грани Б от трещины Тр-3 ответвляется трещина Тр-2. Максимальная нагрузка составила 1700 кгс, затем после выдержки нагрузка на прессе упала до 1 000 кгс.

Для IV-БВ-КО-410 (2). Дальнейшее увеличение ширины раскрытия трещин Тр-1 – Тр-4 и их развитие по высоте сечения. Трещина Тр-5 развилась по высоте и образовалась трещина Тр-5', выходящая из Тр-2 параллельно Тр-5. Выкол бетона сжатой зоны вблизи трещины Тр-4. Произошло смещение блоков балки относительно друг друга на 5 мм (сработал нагельный эффект). Максимальная нагрузка составила 2 000 кгс, затем нагрузка на прессе составила 1 500 кгс.

Выводы

1. На основании экспериментальных исследований железобетонных конструкций из высокопрочного бетона круглого и кольцевого сечений получены достоверные данные о сложном напряженно-деформированном состоянии в исследуемых областях сложного сопротивления при действии изгибающего и крутящего моментов, такие как: значения обобщенной нагрузки трещинообразования $R_{sup,cr}$ и разрушения $R_{sup,u}$, ее уровень относительно предельной нагрузки; расстояние между трещинами на разных уровнях трещинообразования (до момента разрушения, как правило, образуется два-три уровня); ширина раскрытия трещин на уровне оси рабочей арматуры на удалении двух диаметров от осей арматуры и вдоль всего профиля трещины на различных ступенях нагружения, из которых следует, что раскрытие трещин на уровне оси арматуры в 2–3 раза меньше, по сравнению с раскрытием трещин на удалении 1,5–2 диаметров от оси рабочей (продольной и поперечной) арматуры; координаты точек (x ; y ; z) образования пространственных трещин; схемы зарисовки на планшетах образования и развития трещин железобетонных конструкций при кручении с изгибом.

2. В результате проведенных опытных исследований построены графики деформаций (прогибов и углов поворота) по отношению к расчетному сечению 1–1.

3. Построены графики зависимости деформаций бетона по показаниям розетки электротензорезисторов, и по формуле розеток определены главные деформации удлинения и укорочения бетона в зоне, расположенной в окрестности расчетного сечения 1–1; арматура была подобрана таким образом, что в стадии, предшествующей

разрушению, она достигала текучести, поэтому напряжения в арматуре известны. В ряде случаев показания электротензорезисторов продублированы механическими и цифровыми приборами с ценой деления 0,001 мм.

4. Выполнен анализ образования и развития трещин с использованием журнала испытаний железобетонных конструкций из высокопрочного бетона при кручении с изгибом.

5. Установлено, что для железобетонных конструкций из высокопрочного бетона круглого сечения, как правило, наблюдается развитие двух трещин, т. е. круглая форма поперечного сечения несколько снижает концентрацию, обусловленную структурой высокопрочного бетона.

Для железобетонных конструкций из высокопрочного бетона кольцевого сечений имело место несколько трещин, из них выделяется та, по которой происходит разрушение. На ступенях, предшествующих разрушению, эта трещина начинает превалировать над остальными и имеет максимальную ширину раскрытия.

Таким образом, выполненные исследования и полученный результат предоставляют возможность проверки разрабатываемой расчетной модели оценки сопротивления железобетонных конструкций из высокопрочного бетона при действии кручения с изгибом.

Список литературы

1. Бондаренко В.М., Колчунов В.И. Расчетные модели силового сопротивления железобетона. М.: АСВ, 2004. 472 с.
2. Верюжский Ю.В., Колчунов В.И. Методы механики железобетона. Киев: НАУ, 2005. 653 с.
3. Гольшев А.Б., Колчунов В.И. Сопротивление железобетона. Киев: Основа, 2009. 432 с.
4. Гольшев А.Б., Колчунов В.И., Яковенко И.А. Сопротивление железобетонных конструкций, зданий и сооружений, возводимых в сложных инженерно-геологических условиях. Киев: Талком, 2015. 371 с.
5. Генцев Г.А., Колчунов В.И., Клюева Н.В. Прочность и деформативность железобетонных конструкций при запроектных воздействиях. М.: АСВ, 2004. 216 с.
6. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. М.: Стройиздат, 1996. 416 с.
7. Травуш В.И., Конин Д.В., Крылов А.С., Каприелов С.С., Чилин И.А. Экспериментальные исследования сталежелезобетонных конструкций, работающих на из-

гиб // Строительство и реконструкция. 2017. № 4 (72). С. 63–72.

8. 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.

9. 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.

10. Salnikov A.S., Kolchunov V.I., Yakovenko I.A. The computational model of spatial formation of cracks in reinforced concrete constructions in torsion with bending // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vols. 725–726. Pp. 784–789.

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. Mullapudi T., Ayoub A. Analysis of reinforced concrete columns subjected to combined axial, flexure, shear, and torsional loads // Journal of Structural Engineering. Vol. 139. No. 4. Pp. 561–573.

13. Bernardo L.F.A., Teixeira M.M. Modified softened truss-model for prestressed concrete beams under torsion // Journal of Building Engineering. 2018. Vol. 19. Pp. 49–61.

14. Hyunjin J., Kang S.K., Deuck H.L., Jin-Ha H., Seung-Ho C., Young-Hun, O. Torsional responses of steel fiber-reinforced concrete members // Composite Structures. 2015. Vol. 129. Pp. 143–156.

Об авторах

Травуш Владимир Ильич – доктор технических наук, профессор, вице-президент, Российская академия архитектуры и строительных наук (Москва, Российская Федерация). eLIBRARY SPIN-код: 6462-2331. Author ID: 562536. *Область научных интересов:* строительные конструкции и разработка методов их расчета и проектирования. *Контактная информация:* e-mail – travush@mail.ru

Карпенко Николай Иванович – доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией, Научно-исследовательский институт строительной физики, Российская академия архитектуры и строительных наук

(Москва, Российская Федерация). eLIBRARY SPIN-код: 3027-2197. Author ID: 12070. *Область научных интересов:* железобетон, методы его расчета, разработка механики железобетона. *Контактная информация:* e-mail – niisf_lab9@mail.ru

Колчунов Владимир Иванович – доктор технических наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (Курск, Российская Федерация). eLIBRARY SPIN-код: 3990-0345. AuthorID: 527187. *Область научных интересов:* железобетон, методы его расчета, разработка механики железобетона, механика разрушения, строительная механика. *Контактная информация:* e-mail – vlik52@mail.ru

Каприелов Семен Суменович – доктор технических наук, заведующий лабораторией, Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона имени А.А. Гвоздева (Москва, Российская Федерация). Author ID: 601541. *Область научных интересов:* железобетон, технология изготовления железобетонных конструкций, разработка новых высокопрочных бетонов. *Контактная информация:* e-mail – kaprielov@mail.ru

Демьянов Алексей Иванович – кандидат технических наук, доцент, Юго-Западный государственный университет (Курск, Российская Федерация). eLIBRARY SPIN-код: 1447-1505. Author ID: 310035. *Область научных интересов:* железобетон, методы его расчета, разработка расчетных моделей сложного сопротивления железобетонных конструкций при кручении с изгибом. *Контактная информация:* e-mail – sprecscompany@gmail.ru

Конорев Алексей Владимирович – аспирант, Юго-Западный государственный университет (Курск, Российская Федерация). eLIBRARY SPIN-код: 2089-9130. Author ID: 901780. *Область научных интересов:* железобетон, разработка расчетных моделей сложного сопротивления железобетонных конструкций при кручении с изгибом. *Контактная информация:* e-mail – alexeykonorev@mail.ru

Для цитирования

Травуш В.И., Карпенко Н.И., Колчунов В.И., Каприелов С.С., Демьянов А.И., Конорев А.В. 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. Т. 15. № 1. С. 51–61. DOI: 10.22363/1815-5235-2019-15-1-51-61

Main results of experimental studies of reinforced concrete structures of high-strength concrete B100 round and circular cross sections in torsion with bending

Vladimir I. Travush¹, Nikolay I. Karpenko², Vladimir I. Kolchunov^{3*},
Semen S. Kaprielov⁴, Alexey I. Dem'yanov³, Alexey V. Konorev³

¹Russian Academy of Architecture and Construction Sciences
24 Bolshaya Dmitrovka Str., bldg. 1, Moscow, 107031, Russian Federation

²Scientific Research Institute of Construction Physics of
the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences
21 Lokomotivnyy Proezd, Moscow, 127238, Russian Federation

³South-West State University
94 50 let Oktyabrya St., Kursk, 305040, Russian Federation

⁴Research and Development, Design and Technological Institute of
Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev
6 2-ya Institutskaya St., bldg. 5, Moscow, 109428, Russian Federation

*vlik52@mail.ru

(received: November 22, 2018; revised: December 19, 2018; accepted: January 18, 2019)

Abstract. *Aim of the research* to verify the proposed calculating apparatus and accumulate new experimental data on the complex resistance of reinforced concrete structures, experimental studies of such structures made of high-strength concrete of circular and circular cross-section were conducted at the testing base of the South-West State University.

Method is experimental-theoretical.

Results of experimental research the plots of the deflections and rotation angles, the dependency of deformations of concrete according to the testimony of the outlets of electrodesorption with respect to the calculated cross section 1–1. The main deformations of elongation and shortening of concrete were determined; the reinforcement was selected in such a way that in the stage preceding the destruction, it reached fluidity, so the stresses in the reinforcement are known.

It is established that for reinforced concrete structures made of high-strength concrete of circular cross-section, as a rule, there is the development of two cracks, i.e. the round shape of the cross-section slightly reduces the concentration due to the structure of high-strength concrete. For the annular section there were several cracks, of which stands out the one on which the destruction occurs. On the steps preceding the destruction, this crack begins to prevail over the rest and has a maximum opening width.

On the basis of experimental studies of reinforced concrete structures made of high-strength concrete of square and box sections, reliable data on the complex stress-strain state in the studied areas of resistance, such as: the values of the generalized load of cracking $R_{sup,crc}$ and destruction $R_{sup,u}$, its level relative to the limit load; the distance between the cracks at different levels of cracking (up to the moment of destruction, as a rule, two or three levels are formed); crack widths at the level of the axis of the working armature, at a distance of two diameters from the axes of the armature and along the entire crack profile at various stages of loading, from which it follows that the crack opening at the level of the axis of reinforcement in 2–3 times less compared with the crack opening on the removal of 1.5–2 diameters of the working axis (longitudinal and transverse) reinforcement; the coordinates of the spatial formation of cracks; schematic drawings on tablets of education, development and opening of cracks of reinforced concrete constructions in torsion with bending.

Thus, the experimental studies and the result provide an opportunity to test the developed computational model and its working hypotheses for assessing the resistance of reinforced concrete structures made of high-strength concrete in torsion with bending.

Keywords: reinforced concrete structures, high-strength concrete, torsion with bending, experimental results

References

1. Bondarenko V.M., Kolchunov V.I. (2004). *Raschetnye modeli silovogo soprotivleniya zhelezobetona [Computational model of a power resistance of reinforced concrete]*. Moscow: ASV Publ., 472. (In Russ.)

2. Veryuzhskij Yu.V., Kolchunov V.I. (2005). *Metody mekhaniki zhelezobetona [Methods of reinforced concrete mechanics]*. Kiev: NAU Publ., 653. (In Russ.)

3. Golyshev A.B., Kolchunov V.I. (2009). *Soprotivlenie zhelezobetona [Resistance of reinforced concrete]*. Kiev: Osnova Publ., 432. (In Russ.)

4. Golyshev A.B., Kolchunov V.I., Yakovenko I.A. (2015). *Soprotivlenie zhelezobetonnykh konstruksij, zdaniy i sooruzhenij, vozvodimyykh v slozhnykh inzhenerno-geologicheskikh usloviyakh* [Resistance of reinforced concrete structures, buildings and structures erected in complex engineering-geological conditions]. Kiev: Talkom Publ., 371. (In Russ.)

5. Geniev G.A., Kolchunov V.I., Klyueva N.V. (2004). *Prochnost' i deformativnost' zhelezobetonnykh konstruksij pri zaproektnykh vozdeystviyakh* [Strength and deformability of reinforced concrete structures under beyond design impacts]. Moscow: ASV Publ., 216. (In Russ.)

6. Karpenko N.I. (1996). *Obshhie modeli mekhaniki zhelezobetona* [General models of reinforced concrete mechanics]. Moscow: Stroizdat Publ., 416. (In Russ.)

7. Travush V.I., Konin D.V., Krylov A.S., Kapriellov S.S., Chilin I.A. (2017). Experimental studies of steel-reinforced concrete structures working on bending. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya* [Engineering and reconstruction], 4(72), 63–72. (In Russ.)

8. Dem'yanov A.I., Kolchunov V.I., Sal'nikov A.S., Mikhajlov M.M. (2017). Computational model static and dynamic deformation of reinforced concrete constructions in torsion with bending at the time of formation of the spatial crack. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya* [Engineering and reconstruction], 3(71), 13–22. (In Russ.)

9. Kolchunov V.I., Yakovenko I.A. (2016). Calculation model of static-dynamic deformation of reinforced concrete bending structures at the time of destruction of the concrete stretched matrix. *Visnik Kremenchuts'kogo natsional'nogo universitetu imeni Mikhajla Ostrogradskogo* [Bulletin of the Kremenchug national University named after Mikhail Ostrogradsky], 3(98), 56–62. (In Russ.)

10. Salnikov A.S., Kolchunov V.I., Yakovenko I.A. (2015). The computational model of spatial formation of cracks in reinforced concrete constructions in torsion with bending. *Applied Mechanics and Materials*, 725–726, 784–789.

11. Kolchunov V.I., Salnikov A.S. (2016). Experimental study of the cracking of reinforced concrete constructions in torsion with bending. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya* [Engineering and reconstruction], 3(65), 24–32. (In Russ.)

12. Mullapudi T., Ayoub A. (2013). Analysis of reinforced concrete columns subjected to combined axial, flexure, shear, and torsional loads. *Journal of Structural Engineering*, 139(4), 561–573.

13. Bernardo L.F.A. & Teixeira M.M. (2018). Modified softened truss-model for prestressed concrete beams under torsion. *Journal of Building Engineering*, (19), 49–61.

14. Hyunjin J., Kang S.K., Deuck H.L., Jin-Ha H., Seung-Ho C., Young-Hun O. (2015). Torsional responses of steel fiber-reinforced concrete members. *Composite Structures*, (129), 143–156.

About the authors

Vladimir I. Travush – D.Sc. in Technical Sciences, Professor, Vice President, Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (Moscow, Russian Federation). eLIBRARY SPIN-code: 6462-2331. Author ID: 562536. *Research interests*: building structures and the development of methods for their analysis and design. *Contacts*: e-mail – travush@mail.ru

Nikolay I. Karpenko – D.Sc. in Technical Sciences, Professor, Head of Laboratory, Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences (Moscow, Russian Federation). eLIBRARY SPIN-code: 3027-2197. Author ID: 12070. *Research interests*: reinforced concrete, its analysis methods, development of reinforced concrete mechanics. *Contacts*: e-mail – niisf_lab9@mail.ru

Vladimir I. Kolchunov – D.Sc. in Technical Sciences, Professor, South-West State University (Kursk, Russian Federation). eLIBRARY SPIN-code: 3990-0345. Author ID: 527187. *Research interests*: reinforced concrete, its analysis methods, development of reinforced concrete mechanics, fracture mechanics, structural mechanics. *Contacts*: e-mail – vlik52@mail.ru

Semen S. Kapriellov – D.Sc. in Technical Sciences, Head of Laboratory, Research and Development, Design and Technological Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev (Moscow, Russian Federation). Author ID: 601541. *Research interests*: reinforced concrete, manufacturing technology of reinforced concrete structures, development of new high-strength concrete. *Contacts*: e-mail – kapriellov@mail.ru

Alexey I. Dem'yanov – D.Sc. in Technical Sciences, Professor, South-West State University (Kursk, Russian Federation). eLIBRARY SPIN-code: 1447-1505. Author ID: 310035. *Research interests*: reinforced concrete, methods of its analysis, development of design models of complex resistance of reinforced concrete structures under torsion with bending. *Contacts*: e-mail – speccompany@gmail.ru

Alexey V. Konorev – D.Sc. in Technical Sciences, Professor, South-West State University (Kursk, Russian Federation). eLIBRARY SPIN-code: 2089-9130. Author ID: 901780. *Research interests*: reinforced concrete, methods of its analysis, development of design models of complex resistance of reinforced concrete structures under torsion with bending. *Contacts*: e-mail – alexeykonorev@mail.ru

For citation

Travush V.I., Karpenko N.I., Kolchunov V.I., Kapriellov S.S., Dem'yanov A.I., Konorev A.V. (2019). 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*, 15(1), 51–61. DOI: 10.22363/1815-5235-2019-15-1-51-61 (In Russ.)