

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-12-37-46

¹Меркулов С.И., ²Сулейманова Л.А., ²Есипов С.М., ²Кашуба С.О., ²Лесовик Г.А.¹Курский государственный университет²Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

ВЕРИФИКАЦИЯ МЕТОДИКИ ИСПЫТАНИЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО ЭЛЕМЕНТА ПРИ ИЗГИБЕ С КРУЧЕНИЕМ В УСЛОВИЯХ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Аннотация. В статье рассмотрены результаты экспериментальных исследований железобетонных элементов, подвергнутых изгибу с кручением при различных соотношениях крутящего и изгибающего моментов. Целью исследования было сопоставление и оценка сходимости результатов практического испытания элементов с прогнозируемыми параметрами, разработанными на этапе создания новой методики экспериментальных исследований. Было установлено, что работа узлов и приборов испытательного стенда в высокой степени соответствует ожидаемым параметрам. Были изучены технологические особенности проведения испытания, измерены и проанализированы величины отклонений показаний измерительных приборов, фиксирующих как напряженно-деформированное состояние образцов, так и линейных и угловых перемещений точек испытательного стенда. Это позволяет более полно оценить действительную работу образца и выполнить поправку на потенциальную энергию деформирования испытательной машины. Также в статье рассмотрены результаты не только кратковременных, но и длительных испытаний с использованием деталей стенда-оголовников, фиксирующих положение элемента после деформации. Можно сделать вывод о том, что предложенная методика и конструкция испытательного стенда позволяет наиболее полно реализовать условия идеализации работы железобетонного элемента при изгибе с кручением для экспериментального исследования, что позволяет выполнять оценку несущей способности и деформативности элементов на любых этапах жизненного цикла с высокой степенью точности.

Ключевые слова: длительные испытания, железобетонный элемент, изгиб с кручением, верификация испытаний.

Введение. Одновременное воздействие на элемент внешних нагрузок, вызывающих изгиб и кручение относительно продольной оси, является весьма сложным для описания напряженно-деформированным состоянием, над корректным описанием которого трудятся многие ученые. Для создания единой теории работы железобетонных элементов требуются многочисленные экспериментальные исследования, позволяющие собрать базу данных результатов для апробирования и верификации разрабатываемых методов расчета. Одним из направлений данной работы является создание многофункциональных испытательных установок [1–2]. Однако, разработчики подобного оборудования зачастую игнорируют некоторые факторы действительной работы самой испытательной рамы (стенда), что приводит к искажению результатов. К таким факторам относятся: изгибная жесткость балочных элементов, крутильная жесткость узлов опирания, высокая деформативность точек приложения нагрузки и весьма условная реализация способов фиксации образцов в деформированном состоянии. Чтобы корректно производить учет данных факторов необходимо провести верификацию испытательного стенда в близких к реальным условиям и зафиксировать перемещения (линейные и угловые) точек основных узлов, при необходимости дополнить это регистрацией деформаций

длительных испытаний и рассчитать зависимости деформаций стенда от деформаций образца, чтобы использовать их в качестве поправочных коэффициентов при будущих испытаниях. Данным вопросом занимался сравнительно небольшой круг авторов [2–5], т.к. поправки на деформирование испытательных машин стандартных серий при классическом поперечном изгибе широко известны и не требуют дополнительных исследований. Но при внедрении в работу кручения, на первый план выходят уже не линейные, а угловые деформации [6–8], что усложняет работу. Дополнительным фактором является длительность испытаний: установлено, что вследствие перераспределения усилий и проявления текучести стали отдельных участков сечения [9], а также обмятия кромок болтовых соединений [10] действительное значение зафиксированных в момент окончания роста нагрузки усилий может не совпадать со значением, действующим спустя отрезок времени, т.е. стенд «релаксирует». Следовательно, при назначении параметров испытательного оборудования, а также составления программы испытаний необходимо иметь представление о работе стенда под нагрузкой и вносить соответствующие параметры в протокол.

Особую роль при проведении испытаний подобного рода играет этап жизненного цикла здания, при котором совершаются операции с исследуемым конструктивным элементом: на этапе проектирования – расчет и конструирование элемента по 1-ой группе предельных состояний, на этапе возведения – расчет и конструирование элемента по 2-ой группе предельных состояний, на этапе реконструкции – определение параметров усиления. При экспериментальном исследовании усиления, особенно если речь идет о внешнем армировании [11–12], в качестве фактора действительной работы, помимо остальных, появляется технологическая доступность граней элемента для нанесения систем усиления. Поэтому, наравне с жесткостными параметрами, следует также обращать внимание и на громоздкость элементов стенда, и на расстояние от его элементов до образца.

Дополнительные ограничения при подобного рода испытаниях создает сложнопрогнозируемая точка начала роста спиралевидной трещины [2–6], а также нелинейная зависимость между уровнем нагружения и соотношением прироста доли напряжения в сечении к приросту изгибающего момента. Если на этапе жизненного цикла здания возникает необходимость в усилении элемента, то определение направления и проектной зоны анкерки внешнего армирования становится весьма нетривиальной задачей [13–16]. Если при классическом изгибе направление зон растяжения в бетоне вполне легко определить, то работа растянутой зоны при кручении с изгибом, как минимум будет различаться в описании в зависимости от соотношения доли изгибающего и крутящего моментов [17–19].

Материалы и методы. В рамках проведения экспериментальных исследований работы железобетонных конструкций с внешним армированием композитными материалами при изгибе с кручением был разработан стенд [1], общий вид которого в момент испытаний показан на рисунке 1. В рамках поставленных задач были доведены до разрушения 4 идентичных образца при 4 различных отношениях крутящего момента к изгибающему. Каждый из образцов после доведения до условного разрушения был зафиксирован в деформированном состоянии путем создания болтового закрепления оголовников к раме стенда. После выдержки в течение 96 часов показания измерительного оборудования снимались повторно, после чего образец доводился до разрушения.

Также были проведены предварительные расчеты стенда на статическую нагрузку в виде реакции деформированных образцов при соот-

ветствующих уровнях нагружения, в т.ч. результатов долговременных испытаний. Работа образцов принималась абсолютно упругой, растяжением и смятием болтовых (фланцевых) соединений пренебрегалось. Степень адекватности поведения стенда под нагрузкой и соответствия полученных результатов по прочности и жесткости ожидаемым оценивалась путем определения относительного отклонения между экспериментальным значением и предварительно рассчитанным по каждой ступени нагружения с вычислением среднего арифметического [20].



Рис. 1. Стенд для испытаний строительных конструкций на изгиб с кручением при статическом длительном и кратковременном воздействии

Представленная установка позволяет провести испытания балок шириной от 100 до 200 мм, высотой от 100 до 300 мм, длиной от 1,0 до 3,0 м. В середине сечения испытываемого образца образуется зона чистого изгиба с чистым кручением, без воздействия поперечной силы. Величина изгибающего момента варьируется перемещением оголовников по длине балки, а величина крутящего момента изменяется перемещением точки передачи нагрузки от распределительной траверсы на оголовок (эксцентриситет приложения силы). В качестве испытываемых образцов приняты балки сечением 100x200 мм, расчетным пролетом 1.6 м, продольное армирование d10 A500, поперечное d6 A240, бетон B20, армирование и сечение показаны на рисунке 2.

Для выявления закономерностей работы вариативным параметром был эксцентриситет, со значениями 0,0 см; 4,0 см (соотношение Т к

$M = 0,1$); 8,0 см (соотношение T к $M = 0,2$) и 16,0 см (соотношение T к $M = 0,4$). Для описания работы образцов были установлены парные индикаторы часового типа, для определения вертикальных перемещений и углов поворота, схема установки показана на рисунке 3. Ширина раскрытия нормальных трещин фиксировалась на

наиболее раскрытой трещине на участке средней трети пролета кручения, т.е. расстояния между оголовниками. Ширина раскрытия наклонных трещин фиксировалась по наиболее раскрытому участку спиралевидной трещины на участке крайних третей пролета кручения.

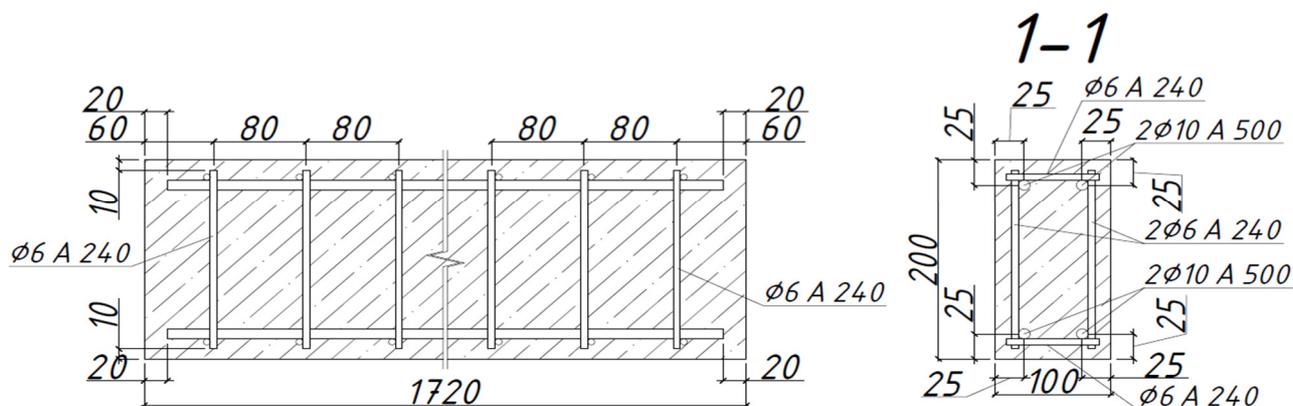


Рис. 2. Сечение и армирование испытываемых балок

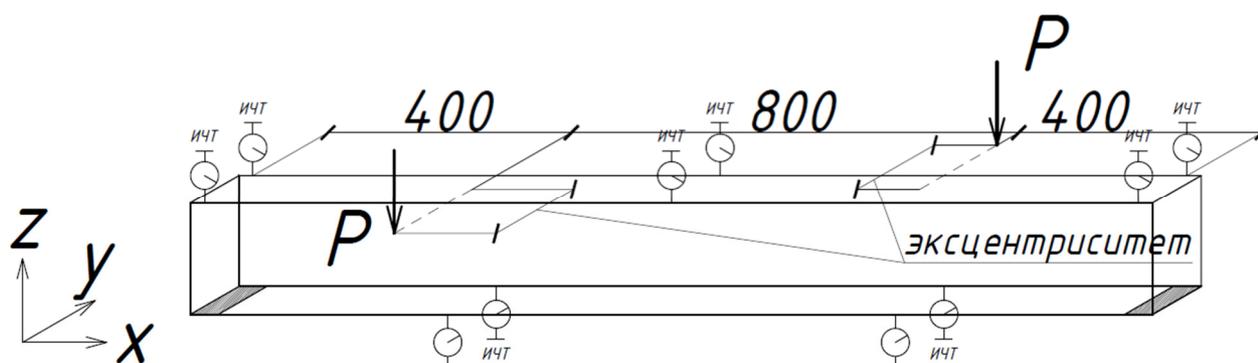


Рис. 3. Схема установки индикаторов часового типа

Основная часть. Шаг нагружения был выбран принят равным 1 кН, что является $\sim 3\%$ от разрушающей нагрузки для балки без эксцентриситета. Необходимое нагружение обеспечивалось работой гидравлического домкрата и насосной станцией, оттарированных на контрольном металлическом образце. В качестве подвижных опор были использованы домкратные резиновые опоры размером $110 \times 120 \times 160$ мм. Данное решение позволило минимизировать сопротивление повороту сечения балок на опоре, с достаточным ограничением вертикальных перемещений. В местах передачи нагрузки от распределительной траверсы на оголовники были установлены домкратные резиновые опоры $d110 \times h50$ мм, позволившие сохранить точку приложения нагрузки, при повороте оголовников.

Для измерения поворота сечения и прогибов балок попарно были установлены индикаторы

часового типа на опорах, оголовниках и в середине сечения (рис. 3). ИЧТ были установлены на отдельные штативы. Они располагались в 50 мм от грани балки. В качестве перемещения каждой точки измерения, принято среднее значение показаний двух индикаторов, а из разницы перемещений вычислен угол поворота сечения в каждой точке. Установка индикаторов на опоре вызвана необходимостью исключения деформации резиновой опоры при определении деформации балки.

Для фиксации образцов на длительный период действия нагрузки, на опорных балках стенда закреплены пластины. Они позволяют закрепить при помощи болтов каждый оголовник с двух сторон, тем самым фиксируя пространственное положение оголовников (рис. 4), при определенном усилии, которое создается гидравлическим домкратом.



Рис. 4. Фиксация положения оголовников

В качестве рассматриваемых и сравниваемых параметров приняты: прогиб балки в середине сечения, т.е. перемещение середины балки относительно перемещения опор (табл. 1), угол поворота балки между оголовниками (таблица 2); ширина раскрытия нормальных (табл. 3) и наклонных трещин (табл. 4). Также косвенно (без прямого измерения разности) были рассмотрены значения деформаций образцов при фиксации их деформированного состояния при исчерпании резерва упругой работы (20–25 % от разрушающего момента). Фиксация изменения деформаций в неупругой стадии не производилась.

В качестве параметра разрушения принято состояние балки, при котором, с последующем

увеличением нагрузки, происходят пластические деформации, препятствующие восприятию нагрузки. В качестве допустимой в рамках верификации погрешности разницы результатов предварительного и натурного эксперимента принята величина в 10 %, полученная как среднее возможное отклонение показаний при более ранних испытаниях различных железобетонных элементов при схожих условиях работы. Следует отметить, что частично в выборке присутствуют отклонения, превышающие 10 %, однако средние значения по всем 4 (для угла поворота и наклонных трещин – по 3) образцам укладывается в назначенный предел.

Таблица 1

Значения прогибов в пролете, их отклонение от ожидаемых

Нагрузка, кН	Эксцентриситет											
	0 см			4 см			8 см			16 см		
	Ожидание, мм	Факт, мм	Δ , %	Ожидание, мм	Факт, мм	Δ , %	Ожидание, мм	Факт, мм	Δ , %	Ожидание, мм	Факт, мм	Δ , %
4	0,85	0,88	3,4	0,80	0,79	0,9	0,30	0,35	14,3	0,55	0,61	10,0
8	1,75	1,83	4,3	1,80	1,96	8,2	1,20	1,39	13,6	1,70	1,88	19,5
12	2,70	2,88	6,2	2,95	3,19	7,5	2,25	2,47	9,0	3,00	3,14	4,7
16	3,95	3,89	1,5	4,25	4,46	4,7	3,60	3,57	1,0	–	–	0
20	5,00	5,14	2,7	5,30	5,67	6,5	5,10	4,87	4,5	–	–	0
24	6,34	6,26	1,9	6,60	6,92	4,6	6,00	6,63	9,5	–	–	0
28	8,10	8,02	1,0	8,20	8,51	3,6	–	–	0	–	–	0
32	9,60	9,38	2,3	–	–	0	–	–	0	–	–	0
36	10,8	12,43	13	–	–	0	–	–	0	–	–	0
	Среднее отклонение, %		4,1	Среднее отклонение, %		4	Среднее отклонение, %		5,8	Среднее отклонение, %		3,8

Таблица 2

Значения углов поворота опорных сечений, их отклонение от ожидаемых

Эксцентриситет									
Нагрузка, кН	4 см			8 см			16 см		
	Ожидание, °	Факт, °	Δ , %	Ожидание, °	Факт, °	Δ , %	Ожидание, °	Факт, °	Δ , %
4	0,06	0,07	14,3	0,07	0,07	0	0,16	0,20	20,0
8	0,12	0,15	20,0	0,25	0,30	16	0,70	0,76	7,9
12	0,25	0,30	16,0	0,50	0,51	2	1,98	2,35	15,7
16	0,42	0,44	5,0	0,70	0,64	9	–	–	0
20	0,61	0,62	1,0	1,05	0,90	14	–	–	0
24	0,85	0,93	8,6	1,60	1,75	8,5	–	–	0
28	1,20	1,11	8,1	–	–	0	–	–	0
	Среднее отклонение, %		10,4	Среднее отклонение, %		7,1	Среднее отклонение, %		10,91

Таблица 3

Значения ширины раскрытия нормальных трещин, их отклонение от ожидаемых

Эксцентриситет												
Нагрузка, кН	0 см			4 см			8 см			16 см		
	Ожидание, мм	Факт, мм	Δ , %	Ожидание, мм	Факт, мм	Δ , %	Ожидание, мм	Факт, мм	Δ , %	Ожидание, мм	Факт, мм	Δ , %
8	0,05	0,05	0	0,04	0,05	20	0,06	0,08	25	0,06	0,06	0
12	0,10	0,10	0	0,06	0,07	14	0,09	0,12	25	0,09	0,09	0
16	0,15	0,15	0	0,12	0,11	8	0,11	0,15	26	–	–	0
20	0,20	0,17	15	0,16	0,15	6	0,14	0,18	22	–	–	0
24	0,25	0,20	20	0,20	0,17	15	0,20	0,30	33	–	–	0
28	0,30	0,30	0	0,24	0,25	4	–	–	0	–	–	0
32	0,35	0,37	5,4	–	–	0	–	–	0	–	–	0
36	0,4	0,50	20	–	–	0	–	–	0	–	–	0
	Среднее отклонение, %		7,5	Среднее отклонение, %		8,4	Среднее отклонение, %		16	Среднее отклонение, %		0

Таблица 4

Значения ширины раскрытия наклонных трещин, их отклонение от ожидаемых

Эксцентриситет									
Нагрузка, кН	4 см			8 см			16 см		
	Ожидание, мм	Факт, мм	Δ , %	Ожидание, мм	Факт, мм	Δ , %	Ожидание, мм	Факт, мм	Δ , %
8	0	0	0	0	0	0	0,07	0,08	12,5
12	0	0	0	0,04	0,05	20	0,35	0,40	12,5
16	0,055	0,07	21	0,08	0,08	0	0,85	0,98	13,2
20	0,11	0,12	8,3	0,118	0,13	9,2	–	–	0
24	0,155	0,15	3,3	0,42	0,50	16	–	–	0
28	0,18	0,17	5,5	–	–	0	–	–	0
	Среднее отклонение, %		6,35	Среднее отклонение, %		7,5	Среднее отклонение, %		6,36

Обращает на себя внимание тот факт, что поведение системы «стенд-образец» под нагрузкой немного отличается от классического: экстремумы отклонений ожидаемых значений от

опытных не имеют четкого характера распределения по уровням нагружения, тогда как обычно отклонение минимально в упругой стадии работы образца и нарастает по мере приближения к стадии разрушения. Данный аспект можно

объяснить сложным напряженно-деформированным состоянием образцов, при котором для расчета прогибов, углов поворота и ширины раскрытия трещин существующих нормативных подходов недостаточно, либо они дают высокий уровень ошибки вследствие неучета одновременности действия нескольких усилий в сечении. Образец с нулевым значением крутящего момента показывает наибольшую сходимости по всем измеряемым факторам. В то же время, следует отметить, что из всех измеряемых факторов ширина раскрытия нормальных трещин получила наибольшие расхождения, что свидетельствует о некорректности модели развития нормальных трещин при наличии крутящего момента в сечении и о взаимном влиянии нормальных и наклонных трещин друг на друга по нижней грани образцов.

Выводы.

Разработанный стенд и методика испытаний для проведения экспериментальных исследований работы железобетонных конструкций с внешним армированием композитными материалами при изгибе с кручением показали свою работоспособность, подтвердив все теоретические гипотезы, а именно:

– значения углов поворота балки на оголовниках и на опорах показали примерно равные значения, подтвердив целесообразность применения податливых резиновых опор. величина отклонения ожидаемых углов поворота от полученных опытным путем составила 9,47 % и не превысила первоначально установленного максимума в 10 %;

– крепление оголовников болтами к опорной части стенда показало свою эффективность. равномерно притягивая оголовники и уменьшая давление в гидравлической системе, опираясь на показания индикаторов часового типа, оголовники были установлены, домкрат исключен из работы, а пространственное положение балки зафиксировано на длительный период. кроме того, установлено, что при работе в упругой стадии роста деформаций между фиксацией деформированного состояния и снятием нагрузки спустя 96 часов не наблюдалось. можно сделать косвенный вывод, что при упругопластической стадии работы все же будет наблюдаться релаксация арматуры и ползучесть бетона;

– величина отклонения ожидаемых прогибов от полученных опытным путем составила 4,4 % и не превысила первоначально установленного максимума в 10 %;

– величина отклонения ширины раскрытия нормальных трещин от полученных опытным путем составила 8 % и не превысила первоначально установленного максимума в 10 %;

– Величина отклонения ширины раскрытия наклонных трещин от полученных опытным путем составила 6,74 % и не превысила первоначально установленного максимума в 10 %.

Оценивая в целом результаты испытаний, следует отметить некоторые результаты, не составляющие основную цель работы:

– появление кручения, равного 0,1 от изгибающего момента уменьшило несущую способность балки на 11,5 %; 0,2 – 31,5 %; 0,4 – 63,0 %;

– во всех случаях приложения нагрузки с эксцентриситетом разрушение происходило от постепенного развития спиралевидной трещины, огибающей зону пролета кручения, и развивающейся от нижней грани элемента по боковой грани под углом 40–50° к продольной оси образца.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Демьянов А.И., Сальников А.С., Колчунов В.И. Экспериментальные исследования железобетонных конструкций при кручении с изгибом и анализ их результатов // Строительство и реконструкция. 2017. № 4(72). С. 17–26.

2. Колчунов В.И., Сальников А.С. Результаты экспериментальных исследований трещинообразования железобетонных конструкций при кручении с изгибом // Строительство и реконструкция. 2016. № 6(68). С. 22–28.

3. Демьянов А.И., Покусаев А.А., Колчунов В.И. Экспериментальные исследования железобетонных конструкций при кручении с изгибом // Строительство и реконструкция. 2017. № 5(73). С. 5–14.

4. Демьянов А.И., Наумов Н.В., Колчунов В.И. Некоторые результаты экспериментальных исследований составных железобетонных конструкций при кручении с изгибом // Строительство и реконструкция. 2018. № 5(79). С. 13–23.

5. Сальников А.С., Колчунов В.И., Яковенко И.А. Расчетная модель образования пространственных трещин первого вида в железобетонных конструкциях при кручении с изгибом // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 3. С. 35–40.

6. Меркулов С.И., Есипов С.М. Экспериментальные исследования сцепления внешней композитной неметаллической арматуры с бетоном // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения. 2017. № 1. С. 93–97.

7. Римшин В.И., Меркулов С.И., Есипов С.М. Бетонные конструкции, усиленные композитным материалом // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2018. № 2(35). С. 93–100. DOI: 10.5281/zenodo.1286034.

8. Есипов С.М., Есипова Д.В. Критерии совместности работы композитного внешнего армирования и железобетонной конструкции при силовых воздействиях // Международный студенческий строительный форум - 2018 (к 165-летию со дня рождения В.Г. Шухова) : Сборник докладов. В 2-х томах, Белгород, 26 ноября 2018 года. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2018. С. 64–69.

9. Меркулов С.И., Есипов С.М. Бетонные конструкции с неметаллической композитной арматурой // Безопасность строительного фонда России проблемы и решения: материалы Международных академических чтений, Курск, 15 ноября 2019 года. Курск: Курский государственный университет, 2019. С. 218–226.

10. Кузнецова М.С., Попова М.В. Особенности расчета железобетонных изгибаемых элементов, усиленных композитными материалами // Дни науки студентов ИАСЭ - 2021 : Материалы научно-практической конференции, Владимир, 22 марта – 09 2021 года. Владимир: Владимирский государственный университет, 2021. С. 178–181.

11. Гаврилова Е.О. Усиление изгибаемых элементов композиционными материалами // Академическая публицистика. 2021. № 8-2. С. 111–119.

12. Волик А.Р., Новицкий Я.Я. Экспериментальные исследования железобетонных балок с внешним армированием растянутой грани композитными тканями // Вестник Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. Серия 6. Техника. 2022. Т. 12. № 1. С. 117–125.

13. Старовойтова И.А., Шакиров А.Р., Зыкова Е.С., Семёнов А.Н., Сулейманов А.М. Исследование физико-механических характеристик модифицированных клеевых связующих для систем внешнего армирования строительных конструкций // Строительные материалы. 2021. № 1-2. С. 98–104. DOI: 10.31659/0585-430X-2021-788-1-2-98-104.

14. Карась М.С., Кушель Р.О. Экспериментальные исследования несущей способности железобетонных балок, усиленных композитными

тканями в середине пролёта // Традиции, современные проблемы и перспективы развития строительства : Сборник научных статей, Гродно, 13–14 мая 2021 года. Гродно: Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, 2021. С. 122–125.

15. Масловская В. Е. Исследование и выбор методов и технологий армирования монолитных бетонных и многослойных конструкций с применением композитных материалов и композитной арматуры // Наука и молодежь : Материалы XVIII всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Барнаул, 19–23 апреля 2021 года. Барнаул: Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, 2021. С. 137–138.

16. Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Зюзина О.В. Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций, усиленных предварительно напряженной базальтокомпозитной арматурой // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2021. Т. 17. № 3. С. 288–298. DOI: 10.22363/1815-5235-2021-17-3-288-298.

17. Курнавина С.О., Антонов М.Д. Поле направлений трещин в железобетонных изгибаемых элементах, усиленных композитными материалами // Строительство и реконструкция. 2020. № 1(87). С. 3–13. DOI: 10.33979/2073-7416-2020-87-1-3-13.

18. Балдин Д.Ю., Краев А.Н., Жайсамбаев Е.А. Сравнительный анализ способов усиления железобетонных тавровых балок // Транспортные сооружения. 2020. Т. 7. № 2. С. 3. DOI: 10.15862/05SATS220.

19. Адамович Д.Н. Нормирование прочностных характеристик композитной арматуры при проектировании и расчёте бетонных и железобетонных конструкций // Традиции, современные проблемы и перспективы развития строительства : Сборник научных статей, Гродно, 21–22 мая 2020 года. Гродно: Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, 2020. С. 30–34.

20. Умаров А.Г., Меретуков З.А., Умаров Р.Г. К вопросу внедрения современных материалов и технологий в строительстве // Инженерный вестник Дона. 2021. № 2(74). С. 285–293.

Информация об авторах

Меркулов Сергей Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой промышленного и гражданского строительства. E-mail: mersi.dom@yandex.ru. Курский государственный университет. Россия, 305000, Курск, ул. Радищева, д. 33.

Сулейманова Людмила Александровна, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительства и городского хозяйства. E-mail: kafedrasigsh@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Есипов Станислав Максимович, кандидат технических наук, доцент кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: sk31.sm@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Кашуба Сергей Олегович, аспирант кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: kashuba_sergey@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Лесовик Галина Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: galina.lesovik@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 07.08.2024 г.

© Меркулов С.И., Сулейманова Л.А., Есипов С.М., Кашуба С.О., Лесовик Г.А., 2024

¹Merkulov S.I., ²Suleymanova L.A., ²Esipov S.M., ²Kashuba S.O., ²Lesovik G.A.

¹Kursk State University

²Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov

VERIFICATION OF THE TEST PROCEDURE FOR A REINFORCED CONCRETE ELEMENT DURING BENDING WITH TORSION IN LONG-TERM OPERATION

Abstract. *In the sources available for research and analysis, including the current regulatory documents, the methods of calculating the elements reinforced with external reinforcement when working on torsion are extremely succinctly considered. This article discusses a number of existing proven methods for calculating reinforced concrete bendable elements with external composite reinforcement, including when working with torsion. The necessity of introducing into the existing calculation dependences of the prerequisites for substantiating the behavior of reinforced concrete bendable elements, including those with external composite reinforcement, when working in a complex stress-strain state is described. The cases of occurrence of additional torsional forces in the conditions of classical variants of loads and impacts on the element are considered. A description of the work of reinforced concrete elements with external reinforcement with composite materials during bending with torsion is proposed. The main provisions of the work of reinforced concrete structures in bending with torsion are given. The main limiting states are given, and assumptions are made about the possible presence of additional limiting states of reinforced concrete elements with external reinforcement with composite materials. A variant of the condition of proportionality of longitudinal relative deformations for reinforced concrete elements with external reinforcement with composite materials during bending with torsion is proposed.*

Keywords: *reinforced concrete structures with external composite reinforcement, torsion resistance with bending, strength calculation, complex stress-strain state, spatial crack.*

REFERENCES

1. Demyanov A.I., Salnikov A.S., Kolchunov V.I. Experimental studies of reinforced concrete structures in torsion with bending and analysis of their results [Eksperimentalnye issledovaniya zhelezobetonnykh konstrukcij pri kruchenii s izgibom i analiz ix rezultatov]. Building and reconstruction. 2017. No. 4(72). Pp. 17–26. (rus)

2. Kolchunov V.I., Salnikov A.S. Results of experimental studies of cracking of reinforced concrete structures during torsion with bending [Rezultaty eksperimentalnykh issledovaniy treshhinoobrazovaniya zhelezobetonnykh konstrukcij pri kruchenii s izgibom]. Building and reconstruction. 2016. No. 6(68). Pp. 22–28. (rus)

3. Demyanov A.I., Pokusaev A.A., Kolchunov V.I. Experimental studies of reinforced concrete

structures in torsion with bending [Eksperimentalnye issledovaniya zhelezobetonnykh konstrukcij pri kruchenii s izgibom]. Building and reconstruction. 2017. No. 5(73). Pp. 5–14. (rus)

4. Demyanov A.I., Naumov N.V., Kolchunov V.I. Some results of experimental studies of composite reinforced concrete structures in torsion with bending [Nekotorye rezultaty eksperimentalnykh issledovaniy sostavnykh zhelezobetonnykh konstrukcij pri kruchenii s izgibom]. Building and reconstruction. 2018. No. 5(79). Pp. 13–23. (rus)

5. Salnikov A. S., Kolchunov V.I., Yakovenko I.A. Computational model of the formation of spatial cracks of the first type in reinforced concrete structures during torsion with bending [Raschetnaya model obrazovaniya prostranstvennykh treshhin pervogo vida v zhelezobetonnykh konstrukciyax pri

kruchenii s izhibom]. Industrial and Civil Engineering. 2015. No. 3. Pp. 35–40. (rus)

6. Merkulov S.I., Esipov S.M. Experimental studies of coupling of external composite nonmetallic reinforcement with concrete [Eksperimentalnye issledovaniya sčepeniya vneshnej kompozitnoj nemetallicheskoj armatury s betonom]. Bezopasnost stroitel'nogo fonda Rossii. Problemy i resheniya. 2017. No. 1. Pp. 93–97. (rus)

7. Rimshin V.I., Merkulov S.I., Esipov S.M. Concrete structures reinforced with composite material [Betonnye konstrukcii, usilennye kompozitnym materialom]. Fefu: school of engineering bulletin. 2018. No. 2(35). Pp. 93–100. DOI 10.5281/zenodo.1286034. (rus)

8. Esipov S.M., Esipova D.V. Criteria for the compatibility of composite external reinforcement and reinforced concrete structures under force influences [Kriterii sovmestnosti raboty kompozitnogo vneshnego armirovaniya i zhelezobetonnoj konstrukcii pri silovyh vozdejstviyah]. Mezhdunarodnyj studencheskij stroitel'nyj forum - 2018 (k 165-letiyu so dnya rozhdeniya V.G. Shukhova) : Sbornik dokladov. Belgorod, November 26, 2018. Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 2018. Pp. 64–69. (rus)

9. Merkulov S.I., Esipov S.M. Concrete structures with non-metallic composite reinforcement [Betonnye konstrukcii s nemetallicheskoj kompozitnoj armaturoj]. Bezopasnost stroitel'nogo fonda Rossii. Problemy i resheniya. Kursk, November 15, 2019. Kursk: Kursk State University, 2019. Pp. 218–226. (rus)

10. Kuznetsova M.S., Popova M.V. Features of calculation of reinforced concrete bendable elements reinforced with composite materials [Osobennosti rascheta zhelezobetonnyh izgibaemyh elementov, usilennyh kompozitnymi materialami]. Dni nauki studentov IASE - 2021 : Materialy nauchno-prakticheskoy konferencii. Vladimir, March 22–09, 2021. Vladimir: Vladimir State University, 2021. Pp. 178–181. (rus)

11. Gavrilova E.O. Reinforcement of bent elements with composite materials [Usilenie izgibaemyh elementov kompozicionnymi materialami]. Akademicheskaya publicistika. 2021. No. 8–2. Pp. 111–119. (rus)

12. Volik A.R., Novitsky Ya.Ya. Experimental studies of reinforced concrete beams with external reinforcement of a stretched face with composite fabrics [Eksperimentalnye issledovaniya zhelezobetonnyh balok s vneshnim armirovaniem rastyanutoj grani kompozitnymi tkanyami]. Vestnik of Yanka Kupala State University of Grodno. Series 6. Technique. 2022. Vol. 12. No. 1. Pp. 117–125. (rus)

13. Starovoitova I.A., Shakirov A.R., Zykova E.S., Semenov A.N., Suleymanov A.M. Investigation of physico-mechanical characteristics of modified adhesive binders for external reinforcement systems of building structures [Issledovanie fiziko-mekhanicheskix harakteristik modifitsirovannyh kleevykh svyazuyushhix dlya sistem vneshnego armirovaniya stroitel'nyh konstrukcij]. Building Materials. 2021. No. 1-2. Pp. 98–104. (rus)

14. Karas M.S., Kushel R.O. Experimental studies of the bearing capacity of reinforced concrete beams reinforced with composite fabrics in the middle of the span [Eksperimentalnye issledovaniya nesushhej sposobnosti zhelezobetonnyh balok, usilennyh kompozitnymi tkanyami v seredine prolyota]. Tradicii, sovremennye problemy i perspektivy razvitiya stroitel'stva : Sbornik nauchnyh statej. Grodno: Grodnenskiy gosudarstvennyj universitet imeni Yanki Kupaly, 2021. Pp. 122–125. (rus)

15. Maslovskaya V.E. Research and selection of methods and technologies of reinforcement of monolithic concrete and multilayer structures using composite materials and composite reinforcement [Issledovanie i vybor metodov i tehnologij armirovaniya monolitnyh betonnyh i mnogoslojnyh konstrukcij s primeneniem kompozitnyh materialov i kompozitnoj armatury]. Science and Youth : Materials of the XVIII All-Russian Scientific and Technical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists, Barnaul, April 19-23, 2021. Barnaul: Altai State Technical University named after I.I. Polzunov, 2021. Pp. 137–138. (rus)

16. Rubin O.D., Lisichkin S.E., Zyuzina O.V. Experimental studies of the stress-strain state of reinforced concrete structures reinforced with prestressed basalt composite reinforcement [Eksperimentalnye issledovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya zhelezobetonnyh konstrukcij, usilennyh predvaritelno napryazhennoj bazaltokompozitnoj armaturoj]. Structural mechanics of engineering constructions and buildings. 2021. Vol. 17. No. 3. Pp. 288–298. (rus)

17. Kurnavina S.O., Antonov M.D. The field of crack directions in reinforced concrete bendable elements reinforced with composite materials [Pole napravlenij treshhin v zhelezobetonnyh izgibaemyh elementah, usilennyh kompozitnymi materialami]. Building and reconstruction. 2020. No. 1(87). Pp. 3–13. (rus)

18. Baldin D.Yu., Kraev A.N., Zhaysambayev E.A. Comparative analysis of ways to strengthen reinforced concrete T-beams [Sravnitel'nyj analiz sposobov usileniya zhelezobetonnyh tavrovyyh balok]. Russian journal of transport engineering. 2020. Vol. 7. No. 2. Pp. 3–20. (rus)

19. Adamovich D.N. Normalization of strength characteristics of composite reinforcement in the design and calculation of concrete and reinforced concrete structures [Normirovanie prochnostnykh karakteristik kompozitnoj armatury pri proektirovanii i raschyote betonnykh i zhelezobetonnykh konstrukcij]. Tradicii, sovremennye problemy i perspektivy razvitiya stroitelstva : Sbornik nauchnykh statej.

Grodno: Grodnenskiy gosudarstvennyy universitet imeni Yanki Kupaly, 2020. Pp. 30–34. (rus)

20. Umarov A.G., Meretukov Z.A. On the issue of the introduction of modern materials and technologies in construction [K voprosu vnedreniya sovremennykh materialov i texnologij v stroitelstve]. Engineering Journal of Don. 2021. No. 2(74). Pp. 285–293. (rus)

Information about the author

Merkulov, Sergey I. Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Industrial and Civil Engineering. E-mail: mersi.dom@yandex.ru. Kursk State University. Russia, 305000, Kursk, st. Radishcheva, 33.

Suleymanova, Ludmila A. Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of construction and urban economy. E-mail: kafedrasigsh@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Esipov, Stanislav M. PhD, Assistant professor. E-mail: sk31.sm@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Kashuba, Sergey O. Master student. E-mail: sk31.sm@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Lesovik, Galina A. PhD, Assistant professor. E-mail: galina.lesovik@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 07.08.2024

Для цитирования:

Меркулов С.И., Сулейманова Л.А., Есипов С.М., Кашуба С.О., Лесовик Г.А. Верификация методики испытаний железобетонного элемента при изгибе с кручением в условиях длительной эксплуатации // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. № 12. С. 37–46. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-12-37-46

For citation:

Merkulov S.I., Suleymanova L.A., Esipov S.M., Kashuba S.O., Lesovik G.A. Verification of the test procedure for a reinforced concrete element during bending with torsion in long-term operation. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 12. Pp. 37–46. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-12-37-46