

УДК 69.059.3

С. И. МЕРКУЛОВ^а, С. М. ЕСИПОВ^б, Д. В. ЕСИПОВА^б^а ФГБОУ ВО «Курский государственный университет», ^б ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова»

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК, УСИЛЕННЫХ КОМПОЗИТНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

Аннотация. Рассмотрена методика проведения и результаты экспериментальных исследований изгибаемых элементов, усиленных по технологии внешнего армирования с композиционными материалами на основе углеродных волокон. Сделаны выводы о влиянии усиления на ширину раскрытия нормальных трещин балок, о влиянии напряженно-деформированного состояния балок в момент усиления на раскрытие трещин.

Ключевые слова: усиление, трещинообразование, углеродные волокна, композитный материал, нормальные трещины, ширина раскрытия трещины.

Для оценки применимости метода усиления железобетонных изгибаемых конструкций методом внешнего армирования необходимо выполнить оценку не только по первой группе предельных состояний [1, 2], но и по второй группе, т. е. по пригодности к эксплуатации. Для железобетонных балок, относящихся к 2-ой и 3-ей категориям трещиностойкости, первостепенными являются предельные состояния достижения предельной ширины раскрытия трещин.

Ряд авторов в своих работах [6–9], рассматривая работу элементов под нагрузкой, не выполняют анализа результатов испытаний неусиленных и усиленных образцов с учетом критериев 2-ой группы предельных состояний. Но, как показывают практические исследования, наличие и ширина раскрытия нормальных (и в т. ч. наклонных в некоторых случаях) силовых трещин в растянутой зоне (в случаях перечисленных исследований – в зоне усиления) определяет форму разрушения усиленной балки и предельные значения изгибающих моментов, при которых элемент усиления и основной элемент будут работать совместно. Кроме того, трещины в значительной мере определяют сопротивление элемента действию коррозии стальной арматуры, что критично для усиливаемых элементов с учетом их долговечности.

Для рассмотрения влияния внешнего армирования на трещинообразование железобетонных балок были выполнены экспериментальные исследования на опытных образцах однопролетных балок пролетом 1 200 мм.

Геометрические размеры сечений, классы бетона и арматуры, конфигурация и диаметры стержней армирования приняты на основании предварительных расчетов с учетом недопущения разрушения по наклонным сечениям либо вследствие потери общей устойчивости. Опытные образцы балок армированы пространственным каркасом из двух плоских сварных каркасов из арматурной стали А400 d8 мм с симметричным расположением продольной растянутой и сжатой арматуры. Рабочая арматура в каркасе расположена в один ряд, количество стержней сжатой арматуры – 2 шт., растянутой – 2 шт. В качестве поперечной арматуры приняты детали типа «П», образованные из стержней из арматурной стали А400 d6 мм. Шаг поперечной арматуры по длине балки переменный: в крайних четвертях – 50мм, в средних – 100мм.

Образцы железобетонных балок были испытаны в 4 серии: Б-1, Б-2, Б-3, Б-4. В серию Б-1 вошли две балки-близнеца Б-1-1 и Б-1-2. Серия Б-1 являлась контрольной. В серию Б-2 вошли две балки

Б-2-1 и Б-2-2. Обе балки до испытаний были усилены внешним армированием из приклеенного к нижней грани однослойного композитного материала шириной 90 мм на основе углеродных волокон. На балке Б-2-2 были устроены торцевые хомуты шириной 120 мм из аналогичного композитного материала. На балке Б-2-1 хомутов нет. В серию Б-3 вошли две балки Б-3-1 и Б-3-2. Балка Б-3-1 была нагружена кратковременной нагрузкой до величины изгибающего момента, равного 50 % от разрушающего для серии Б-1, после чего была полностью разгружена и усилена аналогично балке Б-2-2. Балка Б-3-2 была нагружена кратковременной нагрузкой до величины изгибающего момента, равного 70 % от разрушающего для серии Б-1, после чего была полностью разгружена и усилена аналогично балке Б-2-2. В серию Б-4 вошли две балки Б-4-1 и Б-4-2. Балка Б-4-1 была нагружена кратковременной нагрузкой до величины изгибающего момента, равного 50 % от разрушающего для серии Б-1, после чего была усилена под нагрузкой аналогично балке Б-2-2. Балка Б-4-2 до усиления была нагружена кратковременной нагрузкой до величины изгибающего момента, равного 70 % от разрушающего для серии Б-1, после чего была усилена под нагрузкой аналогично балке Б-2-2. Балки всех серий были доведены до разрушения ступенчатым приложением кратковременной нагрузки. В ходе проведения испытаний регистрировались этапы развития и ширина раскрытия трещин с использованием микроскопа МПБ-100.

Образование нормальных трещин было зарегистрировано во всех образцах в ходе проведения испытаний. Момент образования нормальных трещин определялся визуально, его значения приведены в таблице 1. Согласно полученным данным образование трещин начиналось при величине изгибающего момента, равного:

Таблица 1 – Моменты трещинообразования при испытании образцов

Серия испытаний	Маркировка образца	Теоретический момент трещинообразования $M_{сгс}^{теор}$, кН·м	Экспериментальный момент трещинообразования $M_{сгс}^{эксп}$, кН·м	$\frac{M_{сгс}^{эксп}}{M_{сгс}^{теор}}$
Б-1	Б-1-1	0,9	1,44	20 %
	Б-1-2	0,9	1,44	20 %
Б-2	Б-2-1	1,19	2,83	28 %
	Б-2-2	1,19	2,83	24 %
Б-3	Б-3-1	0,9	1,72	18 %
	Б-3-2	0,9	1,44	16,7 %
Б-4	Б-4-1	0,9	1,44	15,6 %
	Б-4-2	0,9	1,72	20 %

- 20 % от разрушающего момента в балках серии Б-1;
- 24...28 % от разрушающего момента в балках серии Б-2;

Значения моментов трещинообразования для серий Б-3 и Б-4 соответствуют контрольной серии. Появление трещин предшествует усилению.

Таким образом, в ходе испытаний балок с доведением их до разрушения растянутая зона бетона в сечениях с трещинами была частично выключена из работы. При дальнейшем нагружении происходило образование новых, в основном нормальных трещин, а также увеличение высоты и ширины раскрытия ранее образовавшихся трещин. На приопорных участках наблюдалось образование наклонных трещин. Их высота и ширина раскрытия не фиксировались. Наибольшее появление и развитие трещин зарегистрировано в зоне чистого изгиба образцов.

Данные о величине ширины раскрытия нормальных трещин и усредненных расстояний между трещинами в местах пересечения ими продольной арматуры на отдельных этапах нагружения балок приведены в таблице 2. Значение $M_{разр}^{эксп}$ в таблице 2 взято для контрольного образца Б1-1.

Анализ трещинообразования опытных образцов показал, что усиление уменьшает ширину раскрытия трещин по сравнению с контрольной серией во всем диапазоне изгибающих моментов для серий Б-2 и Б-3. Ширина раскрытия трещин уменьшается на 104–108 % в серии Б-2 и 44–67 % в серии Б-3. Образцы серии Б-4 не показали изменения параметров трещинообразования по сравнению с контрольной серией. Стоит отметить, что отслоение внешнего армирования совместно с защитным слоем бетона от конструкции (что вызвало разрушение образцов всех серий) начиналось вблизи трещины с максимальной шириной раскрытия [4, 6].

Таблица 2 – Изменение параметров трещинообразования образцов

Серия испытаний	Маркировка образца	Этап нагружения $M^{эксн} / M^{эксн}_{разр}$, %													
		20–40		40–60		60–80		80–100		100–120		120–140		> 140	
		$a_{crсr}$, мм	$l_{crсr}$, мм	$a_{crсr}$, мм	$l_{crсr}$, мм	$a_{crсr}$, мм	$l_{crсr}$, мм	$a_{crсr}$, мм	$l_{crсr}$, мм	$a_{crсr}$, мм	$l_{crсr}$, мм	$a_{crсr}$, мм	$l_{crсr}$, мм	$a_{crсr}$, мм	$l_{crсr}$, мм
Б-1	Б-1-1	0,03–0,05	101	0,08–0,11	71	0,13–0,2	63	0,19–0,25	51	–	–	–	–	–	–
	Б-1-2	0,03–0,04	103	0,08–0,12	63	0,12–0,18	63	0,2–0,26	60	–	–	–	–	–	–
Б-2	Б-2-1	–	–	0,05–0,08	98	0,08–0,11	96	0,1–0,13	96	0,13–0,23	60	0,23–0,3	55	–	–
	Б-2-2	–	–	0,03–0,05	77	0,06–0,09	77	0,1–0,13	67	0,15–0,2	66	0,23–0,28	65	0,25–0,32	54
Б-3	Б-3-1	0,03–0,05 0,02–0,03	98	0,08–0,13 0,04–0,1	86	0,06–0,13	60	0,1–0,14	50	0,13–0,17	50	0,16–0,22	43	–	–
	Б-3-2	0,03–0,04 0,02–0,03	100	0,07–0,09 0,06–0,08	67	0,12–0,18 0,12–0,15	67	0,12–0,17	50	0,15–0,23	50	–	–	–	–
Б-4	Б-4-1	0,03–0,04	100	0,06–0,09	75	0,09–0,15	75	0,14–0,19	66	0,16–0,2	66	0,24–0,25	48	–	–
	Б-4-2	0,02–0,05	96	0,07–0,09	72	0,09–0,16	54	0,17–0,18	54	0,19–0,26	46	–	–	–	–

Примечание – для образцов серии Б-3 ширина раскрытия трещин в ходе предварительного нагружения без усиления приведена в числителе, в ходе нагружения после усиления – в знаменателе.

Как видно из рисунка 1, отслоение начинается после образования критической нормальной трещины в защитном слое бетона. Взаимное горизонтальное и вертикальное смещение берегов трещин способствует отслоению. Трещина пересекает защитный слой бетона до растянутой стальной арматуры и дальше продолжается в горизонтальной плоскости в направлении опор [3]. Величина раскрытия критической трещины к моменту начала отслоения составила 0,16...0,17 мм.

По данным таблицы 2 был построен график, иллюстрирующий динамику раскрытия трещин по мере увеличения изгибающего момента. График представлен на рисунке 2.

Анализ рисунка 2 позволяет выявить точку излома диаграмм «момент-прогиб» для образцов серий Б-2, Б-3, соответствующую значению изгибающего момента 7,5 кНм [4, 5]. При моменте, превышающем указанную величину, нарастание величины раскрытия трещин ускоряется на 15 % для серии Б-2 и на 5 % для серии Б-3.

Все балки, кроме усиленных под нагрузкой, показали уменьшение ширины раскрытия нормальных трещин во всем интервале нагрузок. Характер распределения трещин по длине зоны чистого изгиба, а также среднее расстояние между трещинами изменяется незначительно. Для ненагруженных балок сокращение раскрытия трещин составило 100...118 %, для разгруженных после приложения нагрузки – 36...54 %. Параметры трещинообразования балок, усиленных под нагрузкой, идентичны параметрам для неусиленных балок. Момент трещинообразования ненагруженных балок повышается на 96 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Меркулов, С. И. Увеличение несущей способности железобетонных изгибаемых конструкций усилением внешним армированием композитным материалом [Текст] / С. И. Меркулов, С. М. Есипов // БСТ: Бюллетень строительной техники. – 2018. – № 2(1002). – С. 56–57.
2. Бетонные конструкции, усиленные композитным материалом [Текст] / В. И. Римшин, С. И. Меркулов, С. М. Есипов // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. – 2018. – № 2(35). – С. 93–100.
3. Влияние реологических свойств бетона на прогибы железобетонных элементов под нагрузкой [Текст] / С. М. Есипов, Д. В. Гридякина, А. А. Володина, К. А. Лосевская // Международный студенческий строительный форум-2017 : сборник докладов: в 2 томах. – Том 2. – 2017. – Белгород : Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова. – 414 с. – С. 260–264. – ISBN: 978-5-361-00582-6.

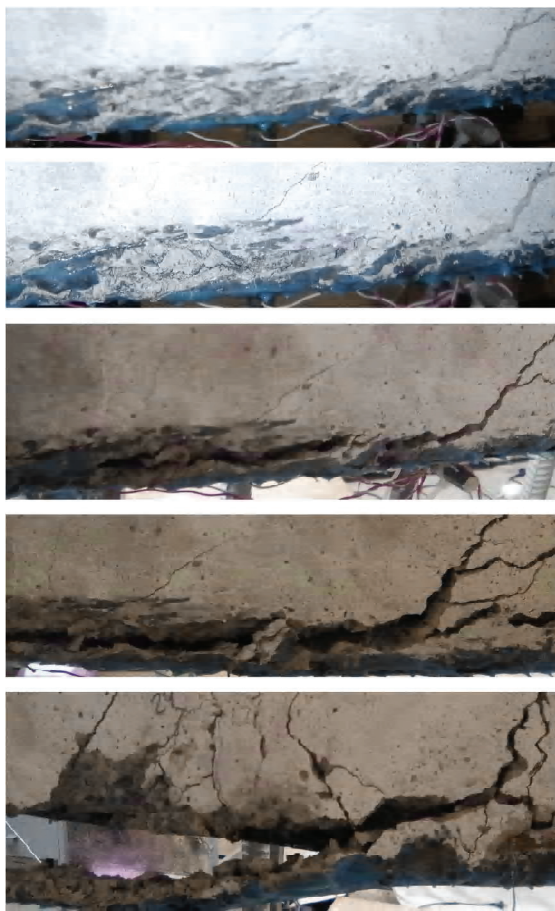


Рисунок 1 – Стадии разрушения контактной зоны «композит-бетон» образца Б-3-1 в интервале изгибающего момента $M = 8,0...9,5$ кН·м (сверху вниз).

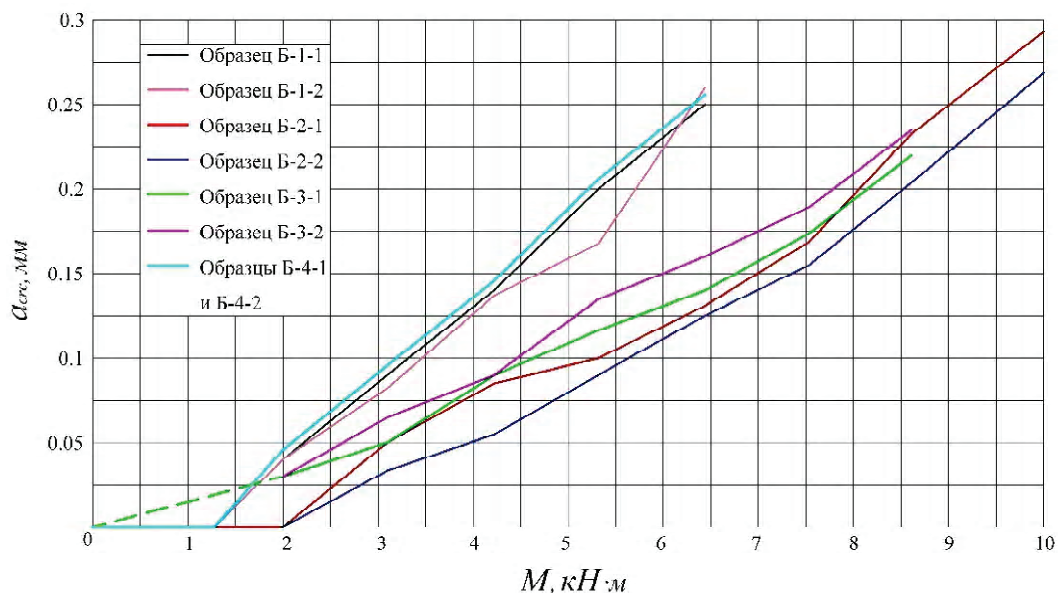


Рисунок 2 – График зависимости ширины раскрытия нормальной трещины от изгибающего момента в сечении.

- Экспериментальные исследования образцов армобетонных балок с различным содержанием в растянутой зоне стержней стеклопластиковой арматуры [Текст] / Н. В. Фролов, Г. А. Смоляго, М. А. Полоз // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. – 2017. – № 1. – С. 60–64.

5. Анализ применения полимеркомпозитной арматуры в армобетонных конструкциях [Текст] / Н. В. Фролов, М. А. Полоз, М. Ш. Ноурузи // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. – 2017. – № 3. – С. 45–50.
6. Григорьева, Я. Е. Прочность и деформативность железобетонных балок, усиленных углепластиком на стадии, близкой к исчерпанию несущей способности [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / Я. Е. Григорьева. – Москва, 2013. – 24 с.
7. Михуб Ахмад Прочность, деформативность и трещиностойкость изгибаемых железобетонных элементов, усиленных композитными материалами [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / Михуб Ахмад. – Ростов-на-Дону, 2013. – 24 с.
8. Параничева, Н. В. Усиление строительных конструкций с помощью углеродных композиционных материалов [Текст] / Н. В. Параничева, Т. В. Назмеева // Инженерно-строительный журнал. – 2010. – № 2. – С. 19–22.
9. Юшин, А. В. Анализ напряженно-деформированного состояния двухпролетных железобетонных балок, усиленных композитными материалами по наклонному сечению, с учетом нелинейности [Текст] / А. В. Юшин, В. И. Морозов // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5. – С. 273–279.

Получено 14.03.2019

С. И. МЕРКУЛОВ ^a, С. М. ЕСИПОВ ^b, Д. В. ЕСИПОВА ^b
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИЩИНОУТВОРЕННЯ
ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК, ПОСИЛЕНИХ КОМПЗИТНИМИ
МАТЕРІАЛАМИ

^a ФДБОУ ВО «Курський державний університет»; ^b ФДБОУ ВО «Белгородський державний технологічний університет ім. В. Г. Шухова»

Анотація. Розглянуто методику проведення і результати експериментальних досліджень згинальних елементів, підсилених за технологією зовнішнього армування з композиційними матеріалами на основі вуглецевих волокон. Зроблено висновки про вплив посилення на ширину розкриття нормальних тріщин балок, про вплив напружено-деформованого стану балок в момент посилення на розкриття тріщин.

Ключові слова: посилення, утворення тріщин, вуглецеві волокна, композитний матеріал, нормальні тріщини, ширина розкриття тріщини.

SERGEY MERKULOV ^a, STANISLAV ESIPOV ^b, DIANA ESIPOVA ^b
EXPERIMENTAL STUDIES OF THE CRACKING OF REINFORCED CONCRETE
BEAMS REINFORCED WITH COMPOSITE MATERIALS

^a Kursk State University, ^b The Federal State Budget Educational of Higher Education «Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov»

Abstract. The methodology and results of experimental studies of bending elements reinforced by external reinforcement technology with composite materials based on carbon fibers are considered. The conclusions are made about the effect of reinforcement on the width of the opening of normal cracks of beams, about the effect of the stress-strain state of beams at the moment of reinforcement on the opening of cracks.

Key words: reinforcement, crack formation, carbon fibers, composite material, normal cracks, crack opening width.

Меркулов Сергей Иванович – доктор технических наук, профессор; заведующий кафедрой промышленного и гражданского строительства ФГБОУ ВО «Курский государственный университет». Член-корреспондент Российской академии архитектуры и строительных наук. Научные интересы: разработка теории реновации и реконструкции конструктивных систем зданий и сооружений.

Есипов Станислав Максимович – старший преподаватель кафедры строительства и городского хозяйства ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова». Научные интересы: реконструкция железобетонных конструктивных систем зданий и сооружений с помощью высокопрочных композитных неметаллических материалов.

Есипова Диана Васильевна – магистрант кафедры строительства и городского хозяйства ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова». Научные интересы: теория конструктивной безопасности реконструированного железобетона с учетом накопления силовых и средовых повреждений.

Меркулов Сергій Іванович – доктор технічних наук, професор; завідувач кафедри промислового та цивільного будівництва ФДБОУ ВО «Курський державний університет». Член-кореспондент російської академії архітектури і будівельних наук. Наукові інтереси: розробка теорії реновації та реконструкції конструктивних систем будівель і споруд.

Єсіпов Станіслав Максимович – старший викладач кафедри будівництва і міського господарства ФДБОУ ВО «Белгородський державний технологічний університет ім. В. Г. Шухова». Наукові інтереси: реконструкція залізобетонних конструктивних систем будівель і споруд за допомогою високоміцних композитних неметалевих матеріалів.

Єсіпова Діана Василівна – магістрант кафедри будівництва та міського господарства ФДБОУ ВО «Белгородський державний технологічний університет ім. В. Г. Шухова». Наукові інтереси: теорія конструктивної безпеки реконструйованого залізобетону з урахуванням накопичення силових і середовищних пошкоджень.

Merkulov Sergey – D. Sc. (Eng.), Professor; the Head of the Industrial and Civil Construction Department, Kursk State University. Scientific interests: increasing the carrying capacity of reinforced concrete bent structures.

Esipov Stanislav – Senior Lecturer, Construction and Municipal Economy Department, The Federal State Budget Educational of Higher Education «Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov». Scientific interests: increasing the carrying capacity of reinforced concrete bent structures.

Esipova Diana – Master's student, Construction and Municipal Economy Department, The Federal State Budget Educational of Higher Education «Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov». Scientific interests: the theory of structural safety of reconstructed reinforced concrete with the accumulation of power and environmental damage.