

А.А. БЫКОВ¹, И.Н. ШАРДАКОВ², А.П. ШЕСТАКОВ², И.О. ГЛОТ²

¹ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь, Россия

²«Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук» - филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь, Россия

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ДЕФОРМАЦИОННОГО ПРОЦЕССА В УСИЛЕННЫХ УГЛЕПЛАСТИКОМ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛКАХ

Аннотация. В статье исследуется поведение железобетонных балок, усиленных углепластиком, в условиях статического нагружения. В эксперименте участвовали 22 крупномасштабных образца – железобетонные балки размером 120х220х1290мм. Часть образцов были усилены углепластиком до нагружения, часть в процессе нагружения после получения первых трещин в бетоне и их инъектирования. Нагружение балок производилось по схеме 4-х точечного изгиба. Деформационное состояние балок контролировалось с помощью тензометрии и прогибомера. Отслоение углепластика оценивалось методом инфракрасной термографии непосредственно в процессе нагружения.

Оценено влияние углепластика на несущую способность и жесткость балок, усиленных до приложения нагрузки и в ходе нагружения. Продемонстрирована способность углепластика сдерживать раскрытие трещин и способность метода усиления углепластиком в сочетании с инъектированием трещин восстановить жесткость конструкции. Представлена картина трещинообразования в образцах. Показано влияние качества подготовки поверхности на характер отслоения углепластика и, как следствие, характер трещинообразования и разрушения. Определены параметры и особенности отслоения углепластика в зависимости от механизма отслоения. Сопоставлены параметры и интенсивность отслоения углепластика при нагружении для балок, усиленных в ненагруженном состоянии и под нагрузкой. Выполнено сравнение экспериментальных значений деформаций отслоения, с теоретическими значениями, определенными по 8-ми известным методикам.

Показано, что фактическая деформация отслоения углепластика на 15-75% ниже значений, вычисленных по формуле СП 164.1325800.2014, а факт отслоения углепластика не определяет предельное состояние усиленной железобетонной балки при наличии надежной анкеровки продольной полосы композита на опорах.

Ключевые слова: железобетонная балка, углепластик, усиление железобетонной балки композитным материалом, отслоение, инфракрасная термография, инъектирование трещин.

A.A. BYKOV¹, I.N. SHARDAKOV², A.P. SHESTAKOV², I.O. GLOT²

¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

²Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of Russian Academy of Science, Perm, Russia

COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE DEFORMATION PROCESS OF RC BEAMS STRENGTHENED WITH CFRP SHEET

Abstract. The paper investigates the behavior of reinforced concrete beams reinforced with CFRP sheet under static loading. The experiment involved 22 large-scale samples – reinforced concrete beams with a size of 120x220x1290mm. One part of the specimens was reinforced with CFRP before loading, the other – under load after the appearance of the first cracks in concrete and their injection. The beams were loaded according to the 4-point bending scheme. The deformation state of the beams was assessed using strain gauge and deflection meter. The debonding of the carbon fiber sheet was evaluated by infrared thermography directly in the process of loading.

The effect of CFRP on the bearing capacity and stiffness of beams reinforced before and during loading is evaluated. The ability of CFRP to restrain the opening of a crack was demonstrated.

© Быков А.А., Шардаков И.Н., Шестаков А.П., Глот И.О., 2023

The effectiveness of the method of reinforcing beams with CFRP in combination with injection of cracks to restore the rigidity of the structure was evaluated. The pattern of crack formation in samples is presented. The influence of the quality of surface preparation on the nature of the debonding of carbon fiber and the features of cracking and destruction is shown. The parameters and features of CFRP debonding were determined for various debonding mechanisms. The parameters and intensity of CFRP debonding for beams reinforced in the unloaded state and under load are compared. The experimental values of debonding strains are compared with theoretical values determined by 8 known methods.

It is shown that the actual deformation of CFRP debonding is 15-75% lower than the values calculated in accordance with Russian Building Codes SP 164.1325800.2014, and the fact of CFRP debonding does not determine the limiting state of the reinforced concrete beam in the presence of reliable anchoring of the longitudinal strip of the composite on supports.

Keywords: CFRP sheets, composite materials, load carrying capacity of RC beams, strengthening of RC beams, interfacial debonding, infrared thermography.

Введение

Основой надежности и долговечности железобетонных конструкций, усиленных композитным материалом, является сцепление элемента усиления с поверхностью бетона. Для железобетонных балок, усиленных внешним армированием композитным материалом, свойственны следующие вероятные сценарии разрушения [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], представленные на рисунке 1.

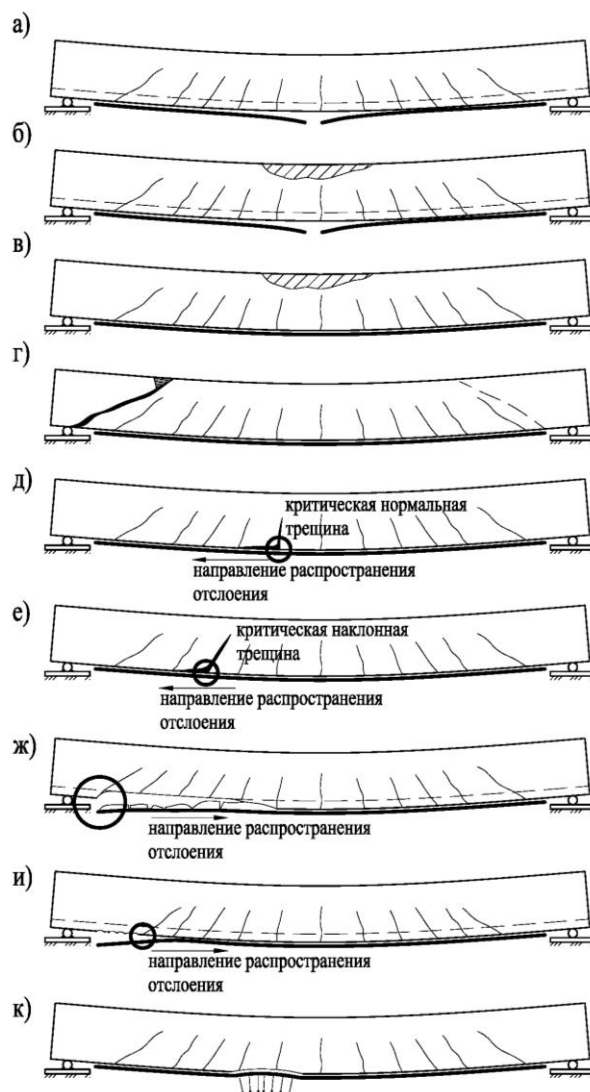


Рисунок 1 – Вероятные сценарии разрушения железобетонной балки, усиленной композитным материалом:

- а) «течение» стальной арматуры и разрыв композита, б) «течение» стальной арматуры и разрыв композита вместе с разрушением бетона сжатой зоны, в) разрушение бетона сжатой зоны, г) разрушение по наклонной трещине, д) отслоение композита из-за раскрытия нормальных трещин, е) отслоение композита из-за раскрытия наклонных трещин, ж) разрушение в результате отслоения защитного слоя бетона, з) разрушение клеевых связей композита с бетоном вследствие продольного сдвига в зоне анкеровки, и) разрушение клеевых связей композита с бетоном вследствие продольного сдвига в зоне анкеровки, к) отслоение композита из-за неровности бетонной поверхности

При наличии надежной анкеровки продольной полосы композита на опорах (не обозначенной на рисунке 1) достижимы варианты (а-г). Вариант (а) характерен для случая, когда площади сечений стальной арматуры и композита малы. Наоборот, если площади сечений стальной арматуры и композита значительны, то разрушение элемента может произойти в сжатой зоне бетона – варианты (б, в). Вариант (г) аналогичен разрушению неусиленного элемента и наступает в случае, если несущая способность усиленного элемента на изгиб превышает несущую способность на сдвиг. При отсутствии надежной анкеровки продольной полосы композита на опорах (не обозначенной на рисунке 1) наиболее вероятными становятся варианты (д-и). Начало отслоения композита по вариантам (д-и) обозначено кружком на рисунке 1. Вариант (к) на практике предотвращается благодаря качественной подготовке основания и не зависит от наличия или отсутствия анкеровки продольной полосы композита на опорах.

Инженерная методика расчета усиления железобетонных конструкций композитными материалами изложена в действующем нормативном документе СП 164.1325800.2014 «Усиление железобетонных конструкций композитными материалами. Правила проектирования». Там приведен единый подход расчета усиления нормального сечения изгибаемого железобетонного элемента композитом, по сути, одновременно учитывающий варианты (а-б, д-и). Таким образом, вне зависимости от наличия или отсутствия надежной анкеровки продольной полосы композита на опорах, факт отслоения композита от бетонного основания приравнивается к предельному состоянию первой группы, при котором происходит исчерпание несущей способности усиленной композитом изгибаемой железобетонной конструкции. Однако для усиленных изгибаемых элементов с анкеровкой композита на опорах экспериментальные данные, подтверждающие, что после начала отслоения композита реализуются состояния, свидетельствующие об исчерпании несущей способности (потеря прочности, устойчивости или выносливости), отсутствуют.

В проведенных на сегодняшний день исследованиях [8], [9], [10], [11], [12], [13] отмечается, что усиленные композитом балки разрушаются в основном из-за отсутствия анкеровки продольных элементов усиления или от действия поперечной силы. Если образцы имеют анкеровку продольных полос композита у опор, а поперечное армирование достаточно для восприятия усилия сдвига, разрушение происходит из-за разрыва композита или раздробления сжатой зоны бетона. В ряде случаев схемы разрушений реализуются совместно, что затрудняет анализ данных. При этом сам процесс отслоения композита от основания, предшествующий указанным формам разрушения, его влияние на деформационное поведение усиленных элементов, взаимосвязь отслоения и трещинообразования в бетоне, а также эволюция отслоения композита в процессе нагружения конструкции исследованы недостаточно [14].

Отказы по вариантам (д-и) характеризуются когезионным разрушением по бетону [15], [16], [17], [18], [19]. Для вариантов (д-е, и) отслоение происходит из-за разрушения бетона в приповерхностном слое небольшой глубины. На всей поверхности композита после разрушения остаются небольшие фрагменты поверхностного слоя бетона толщиной 1-5 мм. Для варианта (ж) на поверхности композита остается практически весь защитный слой бетона. Такой характер разрушения клеевого соединения «композит-бетон» при отслоении композита достигается использованием высокопрочных эпоксидных смол для приклеивания армирующего волокна [20]. Адгезионное разрушение по контакту «клей-бетон» возможно в случае нарушения технологии усиления, например, в случае некачественной подготовки бетонного основания или ошибок в приготовлении и отверждении смолы [15], [18].

В выполненных экспериментальных исследованиях не уделено внимания зависимости между механизмом отслоения (когезионный, адгезионный) и соответствующей величиной деформации композита. Результаты испытания балок, разрушившихся по адгезионному механизму [9], [12], [21], используются для построения или уточнения расчетной зависимости для определения деформации отслоения композита, в то время как корректное

применение технологии предполагает в качестве основного когезионный механизм отслоения.

На сегодняшний день большинство экспериментальных исследований [22], [23] посвящено оценке напряженно-деформированного состояния элементов, которые на момент усиления находились в ненагруженном состоянии. В то же время на практике технология внешнего армирования применяется для железобетонных изгибаемых конструкций с трещинами, находящихся под действием нагрузки, и предполагает необходимость ремонта существующих трещин путем инъектирования, после чего на бетон приклеивается композитный материал. Имеющиеся единичные экспериментальные результаты [24], [25], [26], описывающие работу железобетонных элементов, усиленных в нагруженном состоянии, получены без учета работ по инъектированию существующих трещин и оценке влияния такого ремонта на отслоение элемента усиления.

Целью настоящего исследования является определить параметры процесса отслоения углепластика в изгибаемых железобетонных балках, усиленных внешним армированием до приложения нагрузки и в ходе нагружения после появления первых трещин и их инъектирования.

В соответствии с этой целью решались следующие задачи:

1. Исследовать влияние отслоения углепластика на напряженно-деформированное состояние и несущую способность усиленных внешним армированием железобетонных элементов.
2. Исследовать влияние усиления балок внешним армированием до приложения нагрузки и в ходе нагружения после появления первых трещин и их инъектирования на параметры напряженно-деформированного состояния и параметры отслоения углепластика.
3. Сравнить экспериментальные и теоретические, полученные по известным методикам, значения деформаций отслоения углепластика.

Метод

Для цикла экспериментальных исследований были изготовлены 22 железобетонных балки-образца в стандартных заводских формах. Они были разделены на две группы: группа Б1 выполнена из бетона класса В20, группа Б2 – из бетона класса В35. Балки имеют прямоугольное сечение 120×220 мм и длину 1290 мм. В нижней зоне балок армирование выполнено двумя стержнями диаметром 6 мм (коэффициент армирования $\mu=0,22\%$), в верхней зоне – двумя стержнями диаметром 12 мм ($\mu=0,86\%$). Поперечное армирование выполнено стержнями диаметром 6 мм с различным по длине шагом. Армирование выполнено сталью АIII и представлено на рисунке 2.



Рисунок 2 – Опалубочный чертеж и схема армирования образцов

Каждая группа балок (Б1 и Б2) была разбита на 3 серии по 3-5 образцов: серия «а» – образцы без углепластика; серия «б» – балки, усиленные в ненагруженном состоянии продольным холстом шириной 6 см с анкеровкой U-образными хомутами шириной 20 см на опорах (рисунок 3); серия «в» – балки, усиленные под нагрузкой аналогично серии «б».

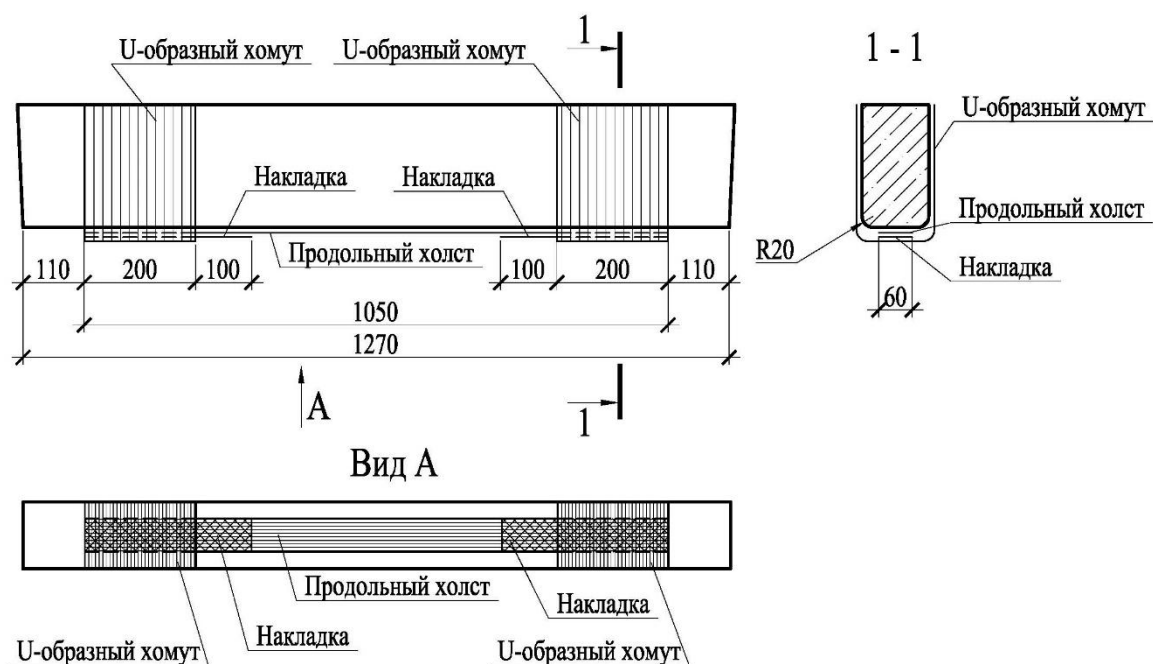


Рисунок 3 – Схема армирования балок углепластиком

На фото 1 показан процесс усиления балок серий «б» и «в». Перед наклейкой углеродного холста поверхность балки шлифовали для удаления цементного молочка, затем промывали водой и высушивали. После подготовки влажность поверхности не превышала 4%. Для усиления использовали углеродный холст SikaWrap-230 и эпоксидную смолу Sikadur-330.

а)

б)



Фото 1 – Приклеивание углеродного холста на балку:
а) для балок серии «б», б) для балок серии «в».

Испытание образцов серии «в» проходило в два этапа: 1 этап – нагружение до появления и раскрытия трещин до 1 мм, 2 этап – догружение балки до разрушения. Между этапами выполняли усиление балки: трещины расшивали, шпаклевали ремонтным составом и инъецировали низковязкой эпоксидной смолой, после чего наклеивали углеродный холст, не снимая с балки нагрузку.

Для шпаклевания расшитых трещин использовали смесь песка фракции 0,5 мм и эпоксидного клея Sikadur-330 в пропорции 1:1. Инъектирование производили при помощи ручного насоса смолой Манопокс 352 производства ООО «Гидрозо».

Статические испытания выполнялись на лабораторном стенде Пермского Национального Исследовательского Политехнического Университета, представленном на фото 2. Нагружение балки производилось по схеме 4-х точечного изгиба. На стальной арматуре, углепластике и бетоне были установлены тензодатчики для контроля деформаций.

Все тензодатчики были подключены к многоканальному регистратору Терем 4.1 и синхронизированы. Нагружение всех балок-образцов выполнялось со ступенчатым увеличением нагрузки с шагом 2 кН, что составляет 4-6% от разрушающей нагрузки. Во время выдержки на каждой ступени выполнялась регистрация картины трещин на поверхности балки, измерение ширины их раскрытия, а также производилась инфракрасная съемка поверхности углепластиковых лент для оценки их отслоения. Запись показаний тензодатчиков велась непрерывно в процессе испытания. После разрушения образцов определялись сечения разрыва арматуры и разрыва ленты углепластика, регистрировались характер отслоения углепластика, места раздробления бетона сжатой зоны, фиксировались трещины, появившиеся после разрушения.

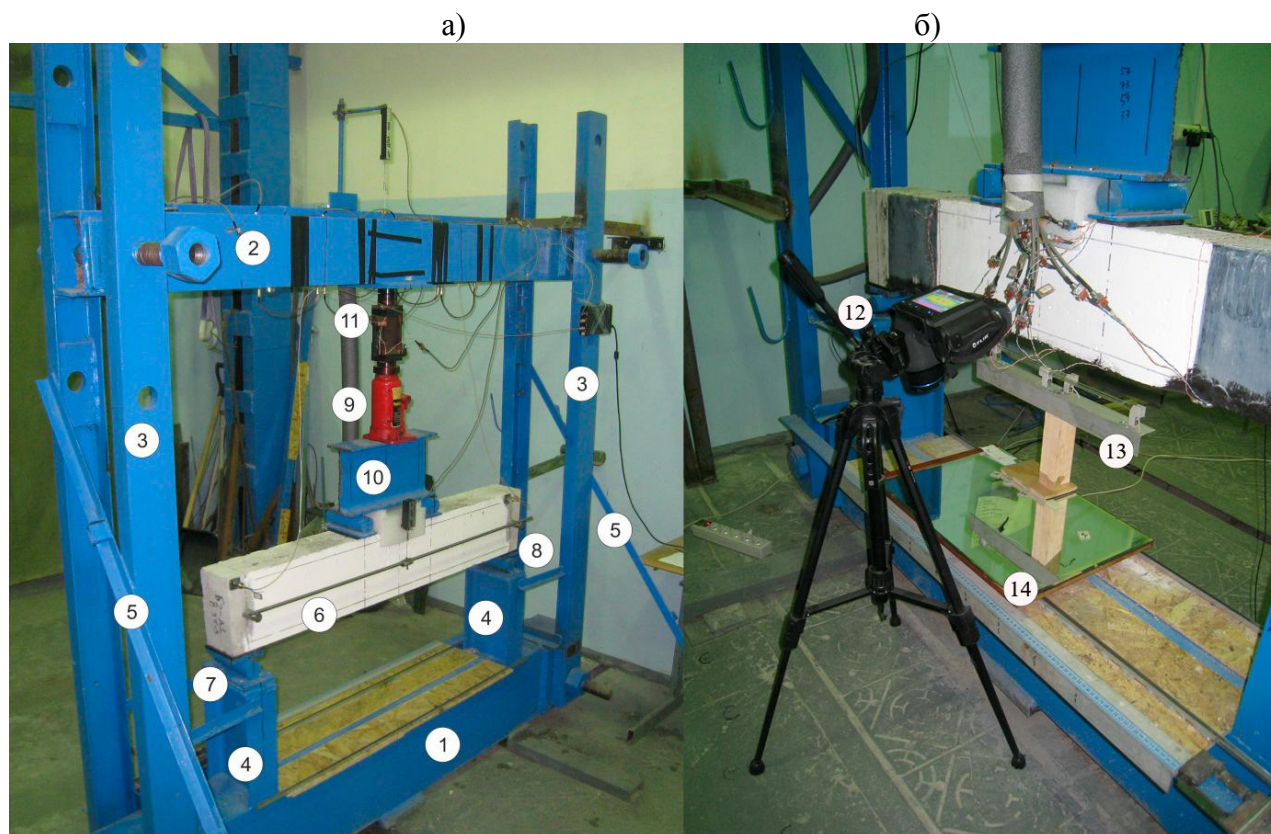


Фото 2 – Стендовое оборудование: а) испытательный стенд, б) схема инфракрасной съемки.

1 – нижняя балка стенда; 2 – верхняя балка стенда; 3 – парная стойка; 4 – стойка; 5 – укос;
6 – балка-образец; 7 – шарнирно-подвижная опора; 8 – шарнирно-неподвижная опора;
9 – гидравлический домкрат; 10 – распределительная балка; 11 – динамометр сжатия;
12 – тепловизор FLIR T620; 13 – галогеновая лампа; 14 – зеркало

Результаты

Результаты статических испытаний

Результаты статических испытаний балок серий «а» и «б» представлены в таблице 1, серии «в» – в таблице 2.

Таблица 1 – Сводные данные результатов статических испытаний балок серий «а» и «б»

Марка образца	M_{crc} , кНм	M_{ult} , кНм	f_{ult} , мм	$a_{crc,max}$, мм	$\varepsilon_{f,ult}$, мкм/м	Характер отслоения углепластика
Б1а-1	3,81	6,13	9,50	2,7	-	-
Б1а-2	3,91	7,45	19,84	2,0	-	-
Б1а-3	4,27	6,92	21,43	2,0	-	-
Среднее	4,00	6,83	-	2,2	-	-
Б1б-1	4,28	10,05	14,29	1,1	12170	адгез.
Б1б-2	5,07	10,42	11,16	0,5	11170	адгез.
Б1б-3	4,33	10,25	8,30	1,0	13370	когез.
Б1б-4	5,40	10,10	8,08	0,9	12180	когез.
Б1б-5	4,32	11,07	9,78	1,1	15040	когез.
Среднее (адгез.)	4,68	10,24	12,72	0,9	11670	-
Среднее (когез.)		10,47	8,72		13530	-
Б2а-1	4,74	6,98	10,60	1,5	-	-
Б2а-2	5,15	6,98	15,75	7,0	-	-
Б2а-3	4,98	7,39	19,73	3,0	-	-
Среднее	4,96	7,12	-	2,2	-	-
Б2б-1	6,14	10,03	10,37	0,8	12180	адгез.
Б2б-2	5,79	10,19	12,52	1,6	10860	адгез.
Б2б-3	5,49	10,56	8,92	1,1	13790	когез.
Б2б-4	5,09	11,46	9,31	1,0	14280	когез.
Б2б-5	5,43	10,27	8,06	1,3	12190	когез.
Среднее (адгез.)	5,59	10,11	11,44	1,1	11520	-
Среднее (когез.)		10,76	8,76		13420	-

Таблица 2 – Сводные данные результатов статических испытаний балок серии «в»

Марка образца	Характеристики 1-го этапа			Характеристики 2-го этапа					Характер отслоения углепластика
	M_{crc} , кНм	Максимальный момент на этапе, кНм	$a_{crc,max}$, мм	M_{crc} , кНм	M_{ult} , кНм	f_{ult} , мм	$a_{crc,max}$, мм	$\varepsilon_{f,ult}$, мкм/м	
Б1в-1	3,32	5,15	1,0	6,79	10,39	10,80	1,4	11680	когез.
Б1в-2	3,60	5,23	1,5	7,19	8,75	9,19	1,5	10190	когез.
Б1в-3	3,86	5,20	1,0	6,59	10,19	11,07	1,3	12760	когез.
Среднее	3,60	5,19	1,2	6,86	10,29	-	1,4	11540	-
Б2в-1	4,30	5,49	1,0	6,88	11,37	10,29	1,1	14180	когез.
Б2в-2	4,92	5,64	0,9	7,02	9,03	9,75	1	8655	когез.
Б2в-3	5,19	5,52	1,0	7,69	10,62	10,72	1,3	12430	когез.
Среднее	4,80	5,55	1,0	7,19	11,00	-	1,1	13305	-

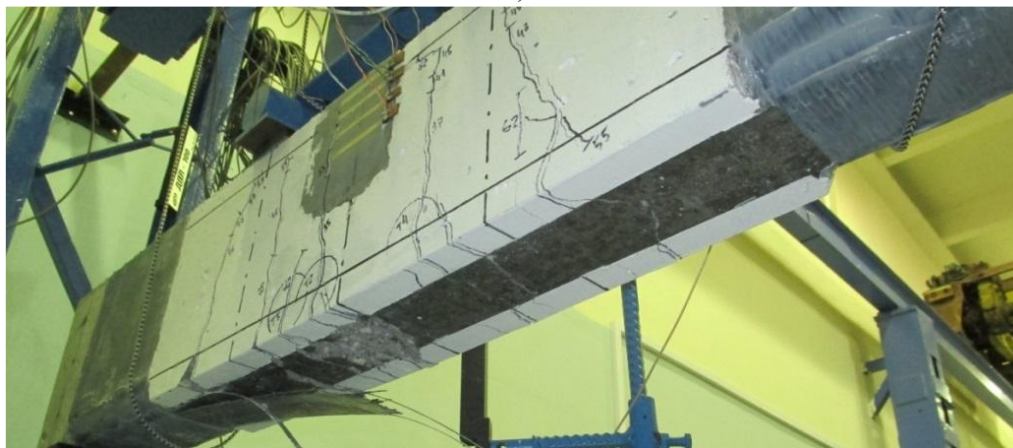
В таблицах 1, 2 использованы обозначения M_{crc} – момент трещинообразования, $a_{crc,max}$ – максимальная ширина раскрытия трещин, M_{ult} – предельный момент, f_{ult} – максимальный прогиб, $\varepsilon_{f,ult}$ – деформации разрыва углепластика. Для усиленных балок зафиксированы два

варианта отслоения углепластика: когезионный по бетону, адгезионный по границе «углепластик-бетон».

При испытании балок серии «а» разрушение образцов происходило из-за разрыва арматуры и раздробления сжатой зоны. Для балок серии «б», «в» разрушение образцов происходило из-за разрыва углепластика (фото 3), которому предшествовало отслоение углепластика.

Эксперимент показал, что характер отслоения определяется качеством подготовки контактной поверхности перед приклеиванием углеродного холста. При очистке поверхности от цементного молочка с помощью металлической щетки (в соответствии с указаниями СП 164.1325800.2014) отслоение углепластика происходило преимущественно по адгезионному типу, причем разрыв осуществлялся в сечении вблизи одного из поперечных анкерочных хомутов. Если контактная поверхность очищалась алмазной чашкой, отслоение реализовывалось по когезионному механизму, и разрыв углепластика наблюдался в средней части пролета.

а)



б)



Фото 3 – Характер разрушения образцов:

а) адгезионное отслоение углепластика, б) когезионное отслоение углепластика

На рисунках 4, 5 приведены зависимости «Изгибающий момент–Прогиб», построенные по результатам испытаний.

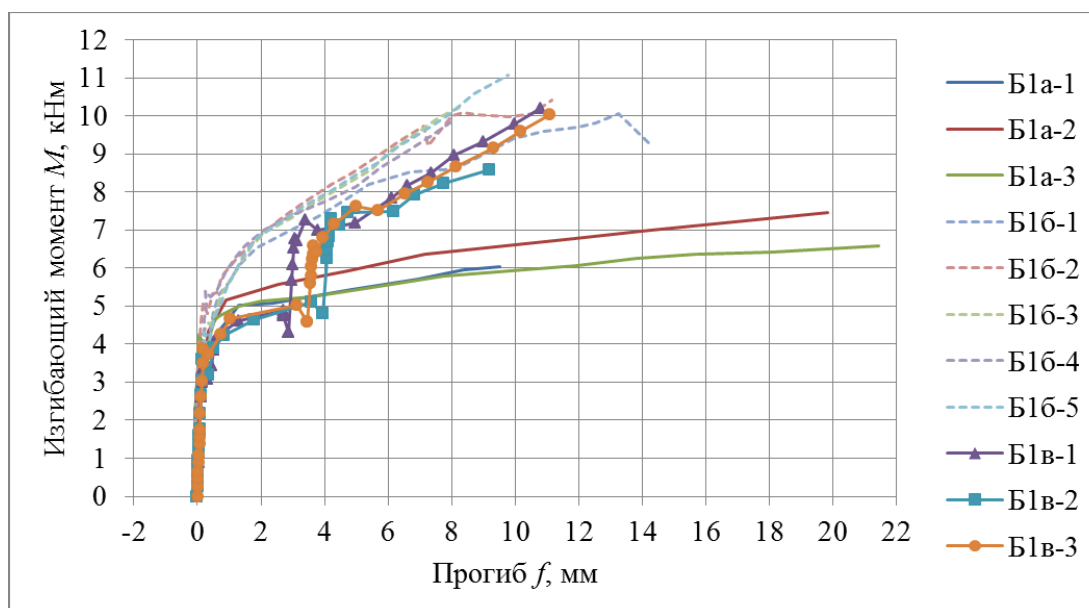


Рисунок 4 – Зависимости M - f для балок группы Б1 серии «а», «б» и «в»

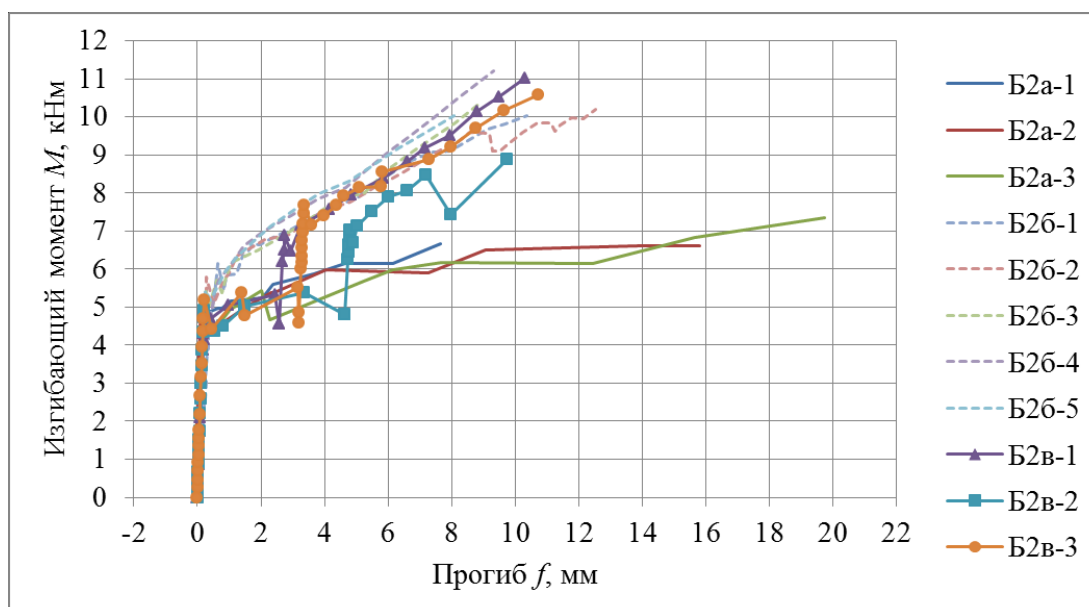


Рисунок 5 – Зависимости M - f для балок группы Б2 серии «а», «б» и «в»

На графиках, описывающих поведение неусиленных (серия «а») и усиленных (серия «б») балок, вначале наблюдается линейный участок деформирования, соответствующий нагружению без образования трещин. После возникновения трещин в бетоне наблюдается изменение угла наклона кривой деформирования. Величина изгибающего момента, соответствующего началу образования трещин в бетоне, для балок серий «а» и «б» отличается незначительно и составляет 4,0 кНм и 4,68 кНм соответственно. Дальнейший рост нагрузки сопровождается увеличением количества и ширины раскрытия трещин и ростом прогиба. При этом в усиленных балках прогиб нарастает медленнее, чем в неусиленных образцах. Углеродистый пластик сдерживает раскрытие трещин и придает дополнительную жесткость конструкции. Так зарегистрированные максимальная ширина раскрытия трещин и прогиб эталонных балок примерно в 2 раза больше, чем в усиленных балках (см. таблицу 1). В целом за счет усиления углеродистым пластиком удастся существенно

увеличить несущую способность балки (максимальный изгибающий момент в сериях «а» и «б» составляет соответственно 6,8 кНм и 10,47 кНм).

График, построенный по результатам испытаний балок, усиленных в ходе нагружения (серия «в»), несет в себе признаки процессов, отмеченных выше. На начальной стадии нагружения, до появления видимых трещин в бетоне, он совпадает с графиком серии «а». После инъектирования трещин и усиления балка вновь ведет себя как неповрежденная конструкция, и на кривой нагружения можно вновь наблюдать линейный участок деформирования, когда восстановлена жесткость и трещиностойкость конструкции. При изгибающем моменте $\sim 7,02$ кНм наблюдается новый излом кривой, соответствующий появлению в бетоне трещин второго поколения, и с дальнейшим ростом нагрузки балка серии «в» ведет себя аналогично балке серии «б». Начало вторичного трещинообразования соответствует изгибающему моменту, который на 45-71% превосходит величину M_{crc} балок серии «а». Предельные значения изгибающего момента (10,47 кНм и 10,29 кНм) и прогиба (8,72 мм и 10,35 мм) у балок серий «б» и «в» близки. Увеличение несущей способности не зависит от того, наклеивался ли углеродный холст до нагружения (серия «б») или под нагрузкой (серия «в»).

Характерные картины трещин на боковой поверхности балок разных серий показаны на рисунке 6. Картины трещин соответствуют шагу нагружения, предшествующему разрушению балки. На балке серии «в» штриховой линией показаны трещины, сформировавшиеся на 1-м этапе нагружения, и сплошными линиями – трещины, возникшие при нагружении балки на 2-ом этапе, после усиления. Из рисунка хорошо видно, что трещины первого поколения локализованы в тех же зонах, что и в неусиленной балке. После инъектирования и усиления они не получили развития при дальнейшем нагружении. В то же время на втором этапе сформировалось новое семейство трещин, и характер их распределения похож на то, что наблюдается в балке серии «б».

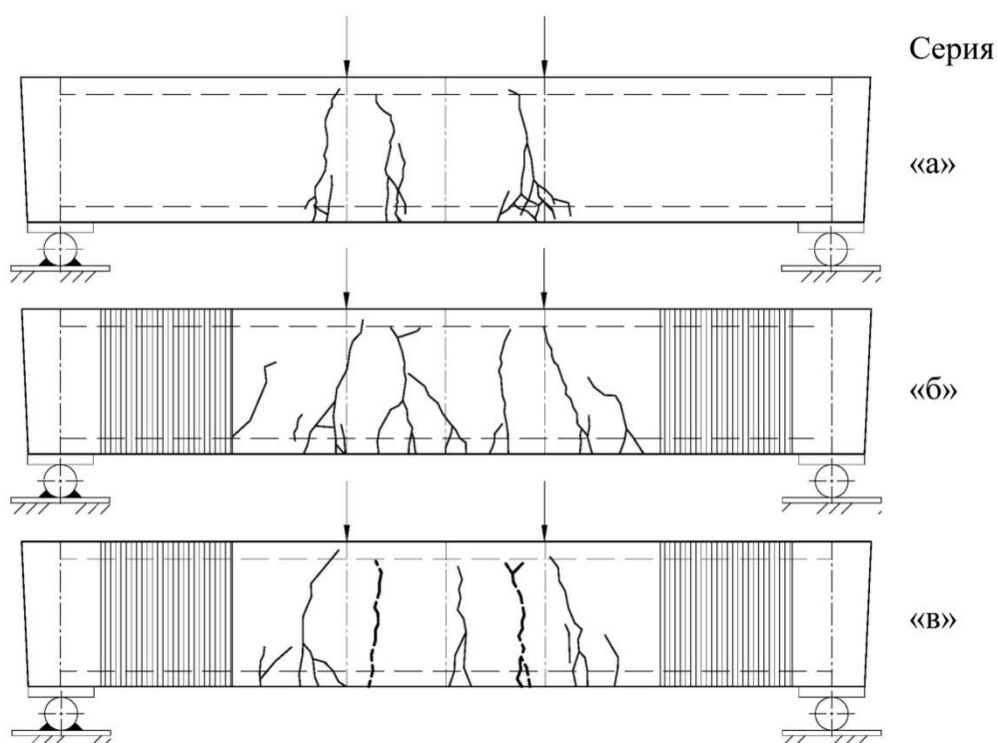


Рисунок 6 – Картина трещин на балках серии «а», «б» и «в» перед разрушением

Для балок, разрушившихся по адгезионному сценарию, характерно развитие сдвиговых трещин на участках между линиями приложения внешней нагрузки и краями

анкерочных хомутов (фото 4). Смещение берегов сдвиговых трещин провоцировало повышенное отслоение и последующий разрыв ленты углепластика именно на этих участках, а также увеличение прогиба балок.

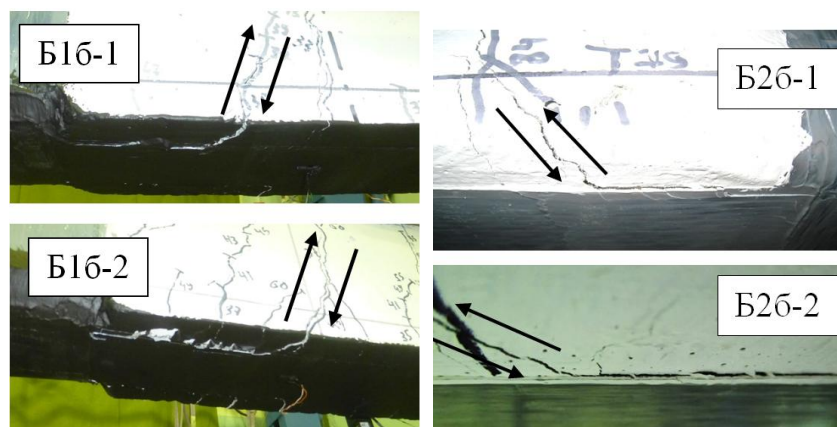


Фото 4 – Трещины сдвига, провоцирующие отслоение

Механические свойства углепластика, использованного для усиления балок в рамках данного исследования, были заранее определены путем испытаний стандартных образцов углепластика на растяжение по ГОСТ 25.601. Экспериментально зафиксированные деформации разрыва углепластика $\varepsilon_{f,ult}$, приклеенного к балкам серий «б», «в», в среднем составили 11500-13500 мкм/м (см. таблицу 1), что в целом хорошо соотносится с результатами испытаний стандартных образцов углепластика на растяжение, для которых деформация разрыва составила 14800 мкм/м. Для всех испытанных балок, разрушение произошло из-за разрыва углепластика, а значит, несущая способность определялась только деформацией, которая достигнута в углепластике. На рисунке 7 показана зависимость предельного изгибающего момента M_{ult} от деформации разрыва в углепластике $\varepsilon_{f,ult}$. Для балок серии «б» данные приведены только для балок, отслоение в которых протекало по когезионному механизму.

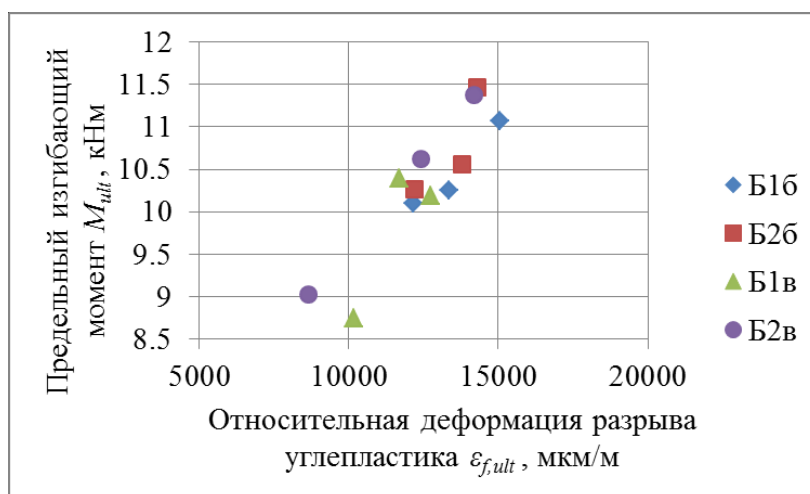


Рисунок 7 – Зависимость предельного изгибающего момента M_{ult} от деформации разрыва углепластика $\varepsilon_{f,ult}$

Видно, что зависимость в целом линейна. Отметим, что линейная зависимость между M_{ult} и $\varepsilon_{f,ult}$ будет справедлива только для балок, сконструированных так, что в предельном состоянии разрушение определяется разрывом углепластика.

Таким образом, можно заключить, что при деформировании в составе усиленной конструкции углепластик полностью исчерпывает свои прочностные свойства, и разрушение конструкции происходит из-за разрыва углепластика, а не из-за его отслоения от бетонной поверхности, которое наблюдается уже при деформациях 5000-6000 мкм/м.

Влияние класса бетона на результаты статических испытаний (предельный изгибающий момент, максимальный прогиб, максимальную ширину раскрытия трещин) предсказуемо отсутствует. Это связано с тем, что на этапе планирования эксперимента площади верхней и нижней стальной арматуры и площадь углепластика были подобраны так, чтобы в предельном состоянии нормального сечения в первую очередь наступал разрыв углепластика, а не раздробление сжатой зоны бетона. Армирование поперечной арматурой приопорных участков выполнено так, чтобы исключить преждевременное разрушение образцов по наклонным сечениям. Кроме того, запроектированный дефицит растянутой стальной арматуры в образцах отражает ситуацию, встречающуюся при реальном проектировании усиления, когда, как правило, сжатая зона сечения отвечает требованиям прочности с некоторым запасом, а растянутая зона ослаблена, например, из-за потери сечения стальной арматуры вследствие коррозии. Отметим, что момент трещинообразования для образцов группы Б2 из бетона В35 ожидаемо выше в среднем на 25% по сравнению с образцами группы Б1 из бетона В20. Экспериментально установлено, что при качественной подготовке контактной поверхности отслоение углепластика происходит по когезионному сценарию как для бетона класса В20, так и В35, что достигается применением высокоадгезионных эпоксидных смол.

Результаты инфракрасной съемки

Контроль процесса отслоения углепластика осуществлялся по предложенной авторами методике на основе инфракрасной термографии [27]. Методика основывается на предположении, что возникновение отслоений углепластика приводит к локальным искажениям теплопроводности конструкции. Регистрация температурного поля на поверхности балки в процессе нагружения позволяет определить те места, где произошло отслоение углепластика.

В соответствии с данной методикой регистрировалась температура нижней поверхности балки на каждом этапе нагружения. В результате обработки полученных термограмм по разработанному авторами алгоритму на каждом шаге нагружения определялись участки поверхности балки, на которых произошло отслоение углепластика. Регистрация температурного состояния поверхности на каждом шаге нагружения позволила зафиксировать нагрузки, которые соответствуют началу отслоения покрытия, активному развитию трещин, разрушению балки.

На рисунке 8 представлены результаты инфракрасной термографии балки Б2б-3 в процессе нагружения. Каждая строка соответствует определенной ступени нагружения, на каждой последующей ступени значение изгибающего момента увеличивается. В первом столбце приведена первичная термограмма, во втором – финальный результат обработки данных – бинарные карты дефектов, наглядно демонстрирующие распределение участков отслоения углепластика на поверхности балки на каждой ступени нагружения.

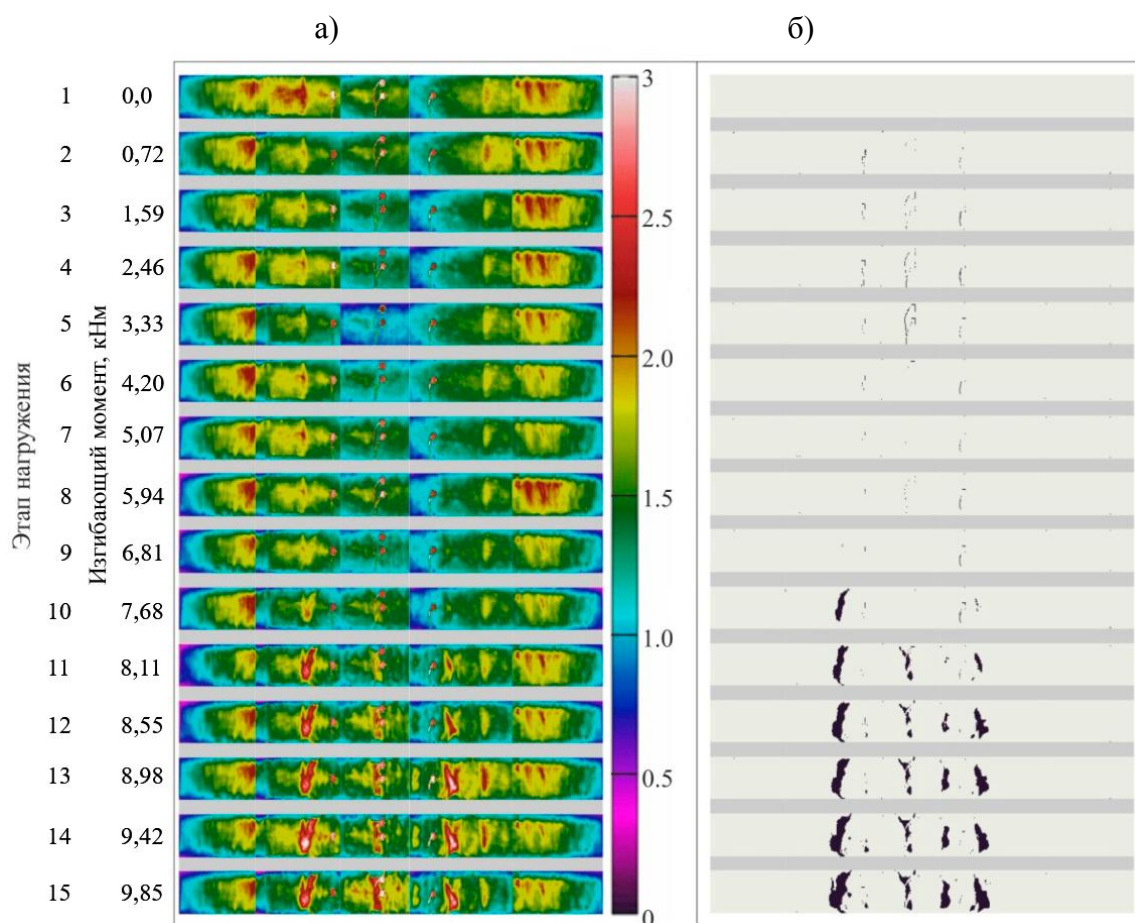


Рисунок 8 – Результаты инфракрасной термографии балки Б26-3 в процессе нагружения: а) первичная термограмма, б) бинарная карта дефектов

По результатам обработки термограмм в таблице 3 сопоставлены значения изгибающего момента, ширины раскрытия трещин в бетоне и деформаций углепластика, соответствующих отслоению углепластика, зафиксированному на бинарных картах.

Таблица 3 – Сводные данные характеристик процесса отслоения

Группа, серия, характер разрушения	Момент, кНм	Ширина трещин, мм	Деформации углепластика, мкм/м
Б1б, адгез.	6,91-8,19	0,3-0,5	4965-7020
Б1б, когез.	7,77-8,58	0,5-0,75	6495-8300
Б2б, адгез.	6,85-6,91	0,3-0,5	5105-6990
Б2б, когез.	7,43-7,98	0,3-0,75	5465-7295
Б1в, когез.	7,62-7,92	0,5-0,7	5260-5780
Б2в, когез.	7,50-8,40	0,3-0,5	5765-6275

Анализ данных таблицы 3 показал следующее:

1. Отслоение углепластика от поверхности бетона начинается при изгибающем моменте, составляющем 68-74% от предельного значения, в среднем на уровне 7,11-7,74 кНм для балок серий «б», «в».
2. Отслоение по адгезионному типу происходит при меньшем уровне деформации углепластика, нежели когезионное отслоение. Разница значений деформаций, отвечающих моменту начала отслоения, составляет 25-35%.
3. В балках серии «в» отслоение реализовалось при деформациях углепластика на 4-65% меньших, чем в балках серии «б», см. таблицу 3.

Начало адгезионного отслоения углепластика благодаря развитию сдвиговых деформаций по податливому слою «бетон-углепластик» сопровождается изменением угла наклона кривой деформирования, см. графики на рисунках 4, 5, и увеличению скорости роста прогиба балки. Аналогичные результаты получены в работе [9]. Когезионное отслоение никак не отражается на кривой деформирования.

Анализ данных тензодатчиков, установленных на углепластике, показал, что появление первой трещины в бетоне, то есть достижение предельных деформаций растяжения для бетона, сопровождается скачкообразным увеличением деформаций в углепластике в 10-15 раз. Таким образом, после появления первой трещины совместность деформаций бетона и углепластика нарушается. Появляется некоторая область, где бетон уже не может воспринимать деформации растяжения и трескается, а углепластик деформируется без разрушения. Эта область, по сути, и является областью отслоения, а момент достижения в бетоне предельных деформаций растяжения, которые определены экспериментально по результатам испытания призм-свидетелей на растяжение при изгибе по ГОСТ 10180 и составляют 130-175 мкм/м для бетона В20...В35, и является началом отслоения.

Было выявлено, что начало отслоения, обусловленное появлением первой трещины в бетоне, не фиксируется на инфракрасной съемке. Так, например, для балки Б2б-3 первая трещина появилась при изгибающем моменте 5,49 кНм (таблица 1), при этом на бинарных картах отслоение на 8-ом этапе нагружения (момент 5,94 кНм) отсутствует (рисунок 8). Заметное в инфракрасном диапазоне отслоение появляется после раскрытия трещин в среднем до 0,5 и 0,3 мм для балок серий «б» и «в» соответственно. Для балки Б2б-3 первое отслоение на бинарной карте появилось на 10-ом этапе при изгибающем моменте 7,68 кНм, что соответствует ширине раскрытия трещин 0,55 мм.

Сопоставление картины трещин и местоположения участков отслоения показало, что отслоение не появляется под трещиной. Для балок серии «б» отслоение развивается на участке между основными магистральными трещинами, для балок серии «в» – между трещинами первого и второго поколений.

Для балок, разрушившихся по адгезионному сценарию, значительные отслоения, сопровождающиеся развитием сдвиговых трещин, распространяются под анкерочные U-образные хомуты (на рисунке 9 участки отслоения на термограммах обозначены белым и красным цветами). Это подтверждается фото 5, где показаны поверхности углепластика и бетона балок после разрушения. После срезки углепластика с поверхности балки было обнаружено, что на участках под U-образными хомутами углепластик отслоился по адгезионному сценарию.

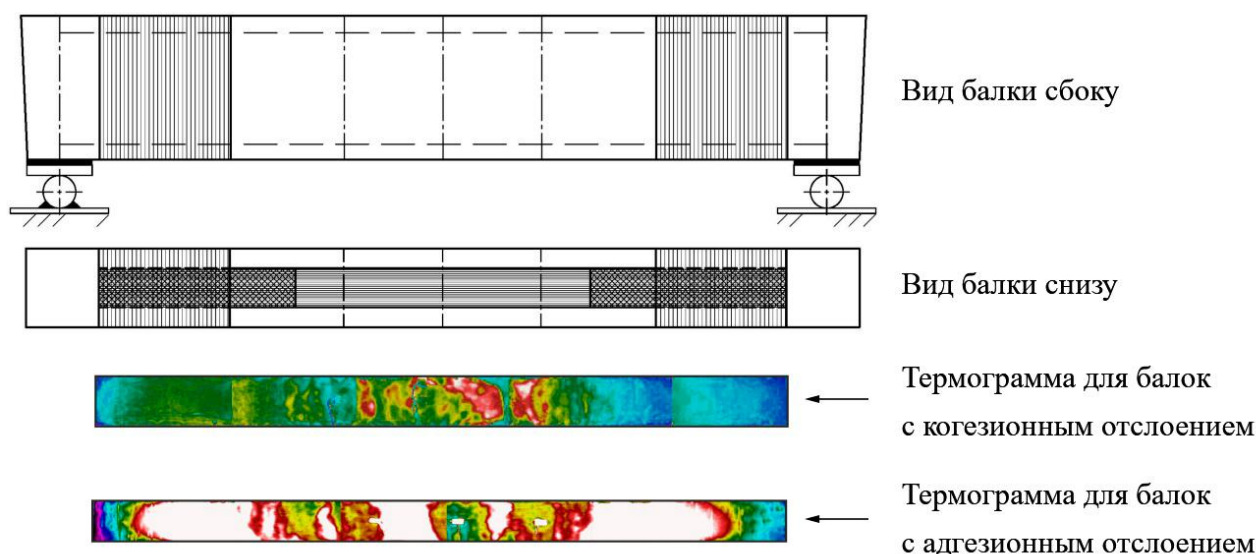


Рисунок 9 – К определению зон интенсивного отслоения для разных сценариев отслоения

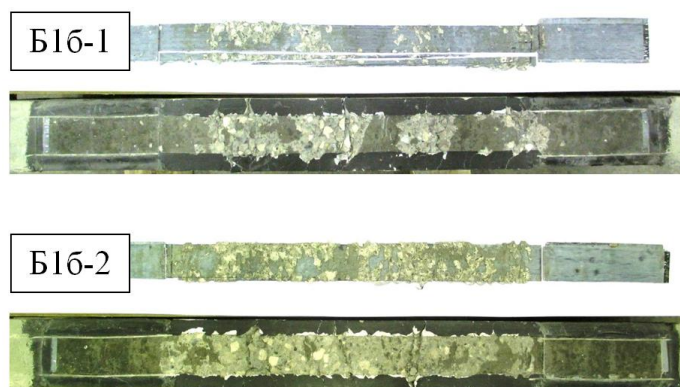


Фото 5 – Поверхность углепластика и бетона после отслоения углепластика

Для балок, разрушившихся по когезионному сценарию, отслоения проявлялись только в средней части пролета, на участке длиной 450 мм, ограниченном сечениями начала приклейки приопорных накладок (см. рисунок 3). В таблице 4 сопоставлена интенсивность процесса отслоения в различных образцах при одинаковом уровне деформации углепластика. Для балок Б1в-2, Б2в-1 и Б2в-2 выписанные данные соответствуют последней ступени, на которой выполнялась инфракрасная съемка. Приведены бинарные карты дефектов и величины относительной площади отслоения, которая определена как отношение суммарной площади дефектных областей на карте дефектов к площади участка однослойного приклеивания углепластика (участка длиной 450 мм, ограниченного сечениями начала приклейки приопорных накладок).

Сравнение интенсивности отслоения в балках, изготовленных из бетона разной прочности, показывает, что при одном и том же уровне деформации углепластика суммарная площадь отслоений в образцах из бетона класса В20 в 1,4–1,5 раза ниже, чем в образцах из бетона класса В35. В балках серии «б» суммарная площадь отслоений в 2,1–2,3 раза меньше, чем в балках серии «в».

Таблица 4 – Относительная площадь отслоений при одинаковом уровне деформаций в углепластике

Марка образца	Бинарная карта дефектов	Относительная площадь отслоения, %		Деформации углепластика, мкм/м	
		Частное	Среднее	Частное	Среднее
Б16-3		7,8	9,71	10300	10360
Б16-4		12,99		10660	
Б16-5		8,34		10140	
Б1в-1		19,77	22,93	10280	9510
Б1в-2		22,59		8020	
Б1в-3		26,43		10240	
Б26-3		11,78	14,90	10810	10360
Б26-4		20,18		10200	
Б26-5		12,73		10070	
Б2в-1		17,86	32,41	8970	8880
Б2в-2		33,08		7220	
Б2в-3		46,29		10450	

Количественный анализ отслоения

В литературе [28], [29], [30], [31], [32], [33], [34], [35] приведен ряд методик вычисления уровня деформации бетонных конструкций, при котором происходит отслоение углепластика. На рисунке 10 даны рассчитанные в соответствии с этими методиками теоретические зависимости относительной деформации углепластика от прочности бетона основания. Расчеты выполнены с учетом характеристик материалов (бетона и углепластика), использованных в настоящем исследовании. Эти зависимости сопоставлены с данными, полученными в нашем эксперименте для балок серий «б» и «в», разрушившихся по когезионному сценарию (точки на графике).

На рисунке 10 видно, что экспериментальные значения деформаций отслоения углепластика слабо зависят от прочности бетона основания. В то же время большая часть упомянутых методик предсказывает, что более прочному бетону соответствуют большие значения деформации отслоения. Кроме того наш эксперимент показал, что эмпирический уровень деформации, соответствующий началу отслоения углепластика, оказался намного ниже теоретического. Формула действующего СП 164.1325800.2014 предлагает значения, превосходящие результаты эксперимента в среднем на 15-75%.

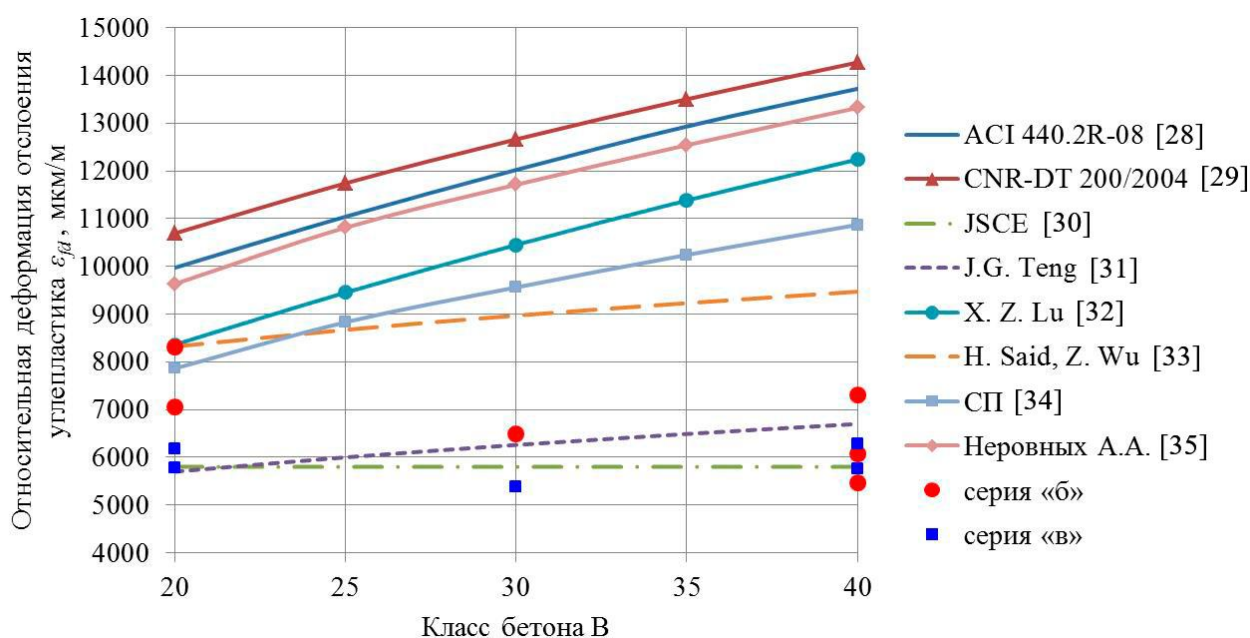


Рисунок 10 – Сопоставление теоретических и экспериментальных значений деформации отслоения

Выводы

На основании проведенных исследований получены следующие выводы:

1. Установлено, что характер отслоения (когезионный или адгезионный) не влияет на несущую способность усиленных углепластиком балок, но влияет на максимальный прогиб в предельном состоянии и на характер распределения трещин.
2. Показано, что несущая способность усиленных углепластиком балок, в предельном состоянии которых разрушение наступает из-за разрыва углепластика, не зависит от того, усилена конструкция под нагрузкой или в ненагруженном состоянии.
3. Установлено, что в конструкциях, усиленных в ненагруженном состоянии и прошедших усиление под нагрузкой после появления первых трещин, деформационное взаимодействие углепластиковой ленты с бетоном различно. Во втором случае процесс отслоения углепластика начинается при деформации углепластика на 4-65% ниже, чем в первом, а относительная площадь отслоения оказывается больше в 2,1-2,3 раза.

4. Продemonстрировано, что начало процесса отслоения углепластика соответствует изгибающему моменту, составляющему 68-74% от предельного, не зависимо от того, усилена конструкция под нагрузкой или в ненагруженном состоянии.

5. Эксперимент показал, что фактическая деформация отслоения углепластика значительно отличается от теоретических значений, полученных по известным методикам. Значения, вычисленные по формуле действующего СП, превышают зарегистрированные экспериментально на 15-75%.

6. Показано, что факт отслоения углепластиковой ленты не определяет предельное состояние усиленной железобетонной балки. В частности, для исследованных балок это состояние характеризуется разрывом углепластиковой ленты. А процесс отслоения может стать индикатором определенного уровня напряженно-деформированного состояния балки.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00108, <https://rscf.ru/project/22-19-00108/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Esfahani M.R., Kianoush M.R., Tajari A.R. Flexural behaviour of reinforced concrete beams strengthened by CFRP sheets // Engineering Structures. 2007. No. 29 (10). Pp. 2428-2444. doi:[10.1016/J.ENGSTRUCT.2006.12.008](https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2006.12.008)
2. Ritchie P.A., Thomas D.A., Lu L.W., Connelly G.M. External reinforcement of concrete beams using fiber reinforced plastics. ATLSS Report No. 90-06. 1990. [Online]. System requirements: Adobe Acrobat Reader. URL: <https://preserve.lib.lehigh.edu/islandora/object/preserve%3AAbp-4308309>. (date of application: 08.12.2022).
3. Saadatmanesh H., Ehsani M.R. RC beams strengthened with GFRP plates. I: Experimental study // ASCE. 1991. No. 117 (11). Pp. 3417-3455. doi:[10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1991\)117:11\(3417\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1991)117:11(3417))
4. Triantafillou T.C., Plevris N. Strengthening of RC beams with epoxy-bonded fibre-composite materials // Materials and Structures. 1992. No. 25 (4). Pp. 201-211. doi:[10.1007/BF02473064](https://doi.org/10.1007/BF02473064)
5. Shahawy M.A., Arockiasamy M., Beitelman T., Sowrirajan R. Reinforced concrete rectangular beams strengthened with CFRP laminates // Composites Part B: Engineering. 1996. No. 27. Pp. 225-233. [http://dx.doi.org/10.1016/1359-8368\(95\)00044-5](http://dx.doi.org/10.1016/1359-8368(95)00044-5)
6. Rahimi H., Hutchinson A. Concrete beams strengthened with externally bonded FRP plates // Journal of Composites for Construction. 2001. No. 5 (1). Pp. 44-56. [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0268\(2001\)5:1\(44\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)1090-0268(2001)5:1(44))
7. Быков А.А., Третьякова А.Н., Калугин А.В. Расчет деформаций отслоения композита для усиленных изгибаемых железобетонных элементов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2014. № 3. С. 112-122.
8. Быков А.А., Калугин А.В., Балакирев А.А. Чистый изгиб железобетонных балок, армированных углеродным холстом // Промышленное и гражданское строительство. 2011. № 7. С. 22-25.
9. Бокарев С.А., Смердов Д.Н. Экспериментальные исследования изгибаемых железобетонных элементов, усиленных композитными материалами // Известия вузов. Строительство. 2010. № 2. С. 112-124.
10. Григорьева Я.Е. Экспериментальное исследование влияния внешнего армирования изгибаемых железобетонных балок углеволокном на прочность и жесткость конструкций // Вестник МГСУ. 2011. № 8. С. 181-185.
11. Маилян Д.Р., Польской П.П. Прочность и деформативность усиленных композитными материалами балок при различных варьируемых факторах [Электронный ресурс] // Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона». 2013. № 2. URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/42R_N2y13.pdf_1676.pdf (дата обращения: 08.12.2022).
12. Шевцов Д.А. Усиление железобетонных конструкций композиционными материалами // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 8. С. 61-65.
13. Леонова А.Н., Чагина А.С. Сравнение особенностей U-образного анкерного крепления с другими видами креплений при усилении конструкций композитным материалом // Научные труды КубГТУ. 2021. № 5. С. 40-50.
14. Римшин В.И., Меркулов С.И. К вопросу усиления железобетонных конструкций внешним армированием композитным материалом // Вестник томского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. № 5. С. 92-100. doi: [10.31675/1607-1859-2018-20-5-92-100](https://doi.org/10.31675/1607-1859-2018-20-5-92-100)
15. Yao J., Teng J.G., Chen J.F. Experimental study on FRP-to-concrete bonded joints // Composites Part B: Engineering. 2005. No. 36 (2). Pp. 99-113. doi:[10.1016/j.compositesb.2004.06.001](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2004.06.001)
16. Taljsten B. Defining anchor lengths of steel and CFRP plates bonded to concrete // International Journal of Adhesion and Adhesives. 1997. No. 17 (4). Pp. 319-327.

17. Woo S.K., Kim J.H.J., Byun K.J., Song Y.C. Bond-slip parameter determination procedure of RC flexure member strengthened with prestressed CFRP plates // *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2013. No. 17 (1). Pp.179 - 191. doi:[10.1007/s12205-013-1592-2](https://doi.org/10.1007/s12205-013-1592-2)
18. Gravina R.J., Hadigheh S.A., Setunge S. Bond and force transfer of FRP materials bonded to concrete using sitecure system // *APFIS 2012*. Hokkaido Univ. Japan. 2012.
19. Pellegrino C., Tinazzi D., Modena C. Experimental Study on Bond Behavior between Concrete and FRP Reinforcement // *Journal of Composites for Construction*. 2008. No. 12 (2). Pp. 180-189.
20. Teng J.G., Chen J.F. Debonding failures of RC beams strengthened with externally bonded FRP reinforcement: behaviour and modeling // *APFIS 2007*. 2007. Pp. 33-42.
21. Бокарев С.А., Костенко А.Н., Смердов Д.Н., Неровных А.А. Экспериментальные исследования при пониженных и повышенных температурах железобетонных образцов, усиленных полимерными композиционными материалами [Электронный ресурс] // Интернет-журнал «Науковедение». 2013. № 3. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/94tvn313.pdf> (дата обращения: 08.12.2022).
22. Польской П.П., Василенко Н.В., Меретуков З.А. О влиянии модуля упругости композитных материалов на прочность и деформативные свойства усиленных конструкций [Электронный ресурс] // Инженерный вестник Дона. 2019. № 8. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-vliyanii-modulya-uprugosti-kompozitnyh-materialov-na-prochnost-i-deformativnye-svoystva-usilennykh-konstruktsiy/viewer> (дата обращения: 08.12.2022).
23. Смердов Д.Н., Яшук М.О. Экспериментальные исследования несущей способности изгибаемых железобетонных элементов, усиленных преднапряженными полимерными композиционными материалами // Научный журнал строительства и архитектуры. 2019. № 3 (55). С. 72-83. doi: 10.25987/VSTU.2019.55.3.008
24. Zhang Ah., Jin Wl., Li Gb. Behavior of preloaded RC beams strengthened with CFRP laminates. *J. Zhejiang Univ. - Sci.* 2006. No. 7 (3). Pp. 436-444. <https://doi.org/10.1631/jzus.2006.A0436>
25. Parikh K. Modhera C.D. Application of GFRP on preloaded retrofitted beam for enhancement in flexural strength // *International journal of civil and structural engineering*. 2012. No. 2 (4). Pp.1070-1080.
26. Римшин В.И., Меркулов С.И., Есипов С.М.. Бетонные конструкции, усиленные композитным материалом // Вестник инженерной школы ДВФУ. 2018. № 2 (35). С. 93-100. doi.org/10.5281/zenodo.1286034
27. Bykov A., Shardakov I., Shestakov A. Determination of thermography modes for recording delamination between composite material and reinforced concrete structures // *Diffusion and Defect Data Pt.B: Solid State Phenomena*. 2015. No. 243. Pp. 97-104. doi: [10.4028/www.scientific.net/SSP.243.97](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.243.97)
28. ACI 440.2R-08. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. ACI. 2008.
29. CNR-DT 200/2004. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures. Rome. 2004.
30. Recommendations for Upgrading of Concrete Structures with Use of Continuous Fiber Sheet // *Concrete Engineering Series 41*. Japan Society of Civil Engineers. 2001.
31. Teng J.G., Smith S.T., Yao J., Chen J.F. Intermediate crack-induced debonding in RC beams and slabs // *Construction and Building Materials*. 2003. No. 17 (6-7). Pp. 447-462.
32. Lu X.Z., Teng J.G., Ye L.P., Jiang J.J. Intermediate crack debonding in FRP-strengthened RC beams: FE analysis and strength model // *Journal of Composites for Construction*. 2007. No. 11(2). Pp.161-174. doi:[10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2007\)11:2\(161\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2007)11:2(161))
33. Said H., Wu Z. Evaluating and proposing models of predicting IC debonding failure // *Journal of Composites for Construction*. 2008. No. 12 (3). Pp. 284-299. doi:[10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2008\)12:3\(284\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2008)12:3(284))
34. СП 164.1325800.2014. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами. Правила проектирования.
35. Неровных А.А. Автореферат. Совершенствование методики оценки грузоподъемности железобетонных пролетных строений железнодорожных мостов, усиленных композиционными материалами. Новосибирск. 2013.

REFERENCES

1. Esfahani M.R., Kianoush M.R., Tajari A.R. Flexural behaviour of reinforced concrete beams strengthened by CFRP sheets. *Engineering Structures*. 2007. Vol. 29. Issue 10. Pp. 2428-2444. doi:[10.1016/J.ENGSTRUCT.2006.12.008](https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2006.12.008)
2. Ritchie P.A., Thomas D.A., Lu L.W., Conelly G.M. External reinforcement of concrete beams using fiber reinforced plastics. ATLSS Report No. 90-06. 1990. [Online]. System requirements: Adobe Acrobat Reader. URL: <https://preserve.lib.lehigh.edu/islandora/object/preserve%3Abp-4308309>. (date of application: 08.12.2022).
3. Saadatmanesh H., Ehsani M.R. RC beams strengthened with GFRP plates. I: Experimental study // *ASCE*. 1991. Vol. 117. No. 11. Pp. 3417-3455. doi:[10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1991\)117:11\(3417\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1991)117:11(3417))

4. Triantafyllou T.C., Plevris N. Strengthening of RC beams with epoxy-bonded fibre-composite materials // *Materials and Structures*. 1992. Vol. 25. Issue 4. Pp. 201-211. doi:[10.1007/BF02473064](https://doi.org/10.1007/BF02473064)
5. Shahawy M.A., Arockiasamy M., Beitelman T., Sowrirajan R. Reinforced concrete rectangular beams strengthened with CFRP laminates // *Composites Part B: Engineering*. 1996. Vol. 27. Issues 3-4. Pp. 225-233. [http://dx.doi.org/10.1016/1359-8368\(95\)00044-5](http://dx.doi.org/10.1016/1359-8368(95)00044-5)
6. Rahimi H., Hutchinson A. Concrete beams strengthened with externally bonded FRP plates // *Journal of Composites for Construction*. 2001. Vol. 5. No. 1. Pp. 44-56. [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0268\(2001\)5:1\(44\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)1090-0268(2001)5:1(44))
7. Bykov A.A., Tretyakova A.N., Kalugin A.V. Raschet deformatsii otsloeniia kompozita dlia usilennykh izgibaemykh zhelezobetonnykh elementov [Delamination buckling analysis for reinforced concrete flexural elements]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Journal of Construction and Architecture*. 2014. Vol. 3. Pp. 112-122. (rus).
8. Bykov A.A., Kalugin A.V., Balakirev A.A. Chisty izgib zhelezobetonnykh balok, armirovannykh uglerodnym kholstom [Pure bending of reinforced concrete beams reinforced with carbon-based cloth]. *Industrial and civil engineering*. 2011. Vol. 7. Pp. 22-25. (rus).
9. Bokarev S.A., Smerdov D.N. Eksperimentalnye issledovaniia izgibaemykh zhelezobetonnykh elementov, usilennykh kompozitnymi materialami // *Izvestiia vuzov. Stroitel'stvo*. 2010. Vol. 2. Pp. 112-124. (rus).
10. Grigoryeva Y.Y. Eksperimentalnoe issledovanie vliianiia vneshnego armirovaniia izgibaemykh zhelezobetonnykh balok uglevoloknom na prochnost i zhestkost konstrukttsii [Experimental research of influence of external reinforcing of bent reinforced concrete beams with FRP composites on durability and rigidity of designs]. *Vestnik MGSU*. 2011 Vol. 8. Pp. 181-185. (rus).
11. Polskoy P.P., Mailian D.R. Prochnost i deformativnost usilennykh kompozitnymi materialami balok pri razlichnykh variruemykh faktorakh. [Online]. *Elektronnyi nauchnyi zhurnal «Inzhenernyi vestnik Dona»*. 2013. Vol. 2. System requirements: Adobe Acrobat Reader. URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/42R_N2y13.pdf_1676.pdf (date of application: 08.12.2022). (rus).
12. Shevtsov D.A. Usilenie zhelezobetonnykh konstrukttsii kompozitsionnymi materialami [Strengthening of reinforced concrete structures with fiber reinforced composites]. *Industrial and civil engineering*. 2014. Vol. 8. Pp. 61-65. (rus).
13. Leonova A.N., Chagina A.S. Sravnenie osobennostei U-obraznogo ankernogo krepleniia s drugimi vidami krepleniia pri usilenii konstrukttsii kompozitnym materialom [Comparison of the features of u-shaped anchorage with other types of fasteners when reinforcing structures with composite material]. *Scientific Works of the Kuban State Technological University*. 2021. Vol. 5. Pp. 40-50. (rus).
14. Rimshin V.I., Merkulov S.I. K voprosu usileniia zhelezobetonnykh konstrukttsii vneshnim armirovaniem kompozitnym materialom [External reinforcement of concrete structures using composite materials]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. JOURNAL of Construction and Architecture*. 2018. Vol. 5. Pp. 92-100. (rus). doi:[10.31675/1607-1859-2018-20-5-92-100](https://doi.org/10.31675/1607-1859-2018-20-5-92-100)
15. Yao J., Teng J.G., Chen J.F. Experimental study on FRP-to-concrete bonded joints // *Composites Part B: Engineering*. 2005. Vol. 36. Issue 2. Pp. 99-113. doi:[10.1016/j.compositesb.2004.06.001](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2004.06.001)
16. Taljsten B. Defining anchor lengths of steel and CFRP plates bonded to concrete // *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 1997. Vol.17. Issue 4. Pp. 319-327.
17. Woo S.K., Kim J.H.J., Byun K.J., Song Y.C. Bond-slip parameter determination procedure of RC flexure member strengthened with prestressed CFRP plates // *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2013. Vol. 17. Issue 1. Pp.179 - 191. doi:[10.1007/s12205-013-1592-2](https://doi.org/10.1007/s12205-013-1592-2)
18. Gravina R.J., Hadigheh S.A., Setunge S. Bond and force transfer of FRP materials bonded to concrete using sitecure system // *APFIS 2012. Hokkaido Univ. Japan*. 2012.
19. Pellegrino C., Tinazzi D., Modena C. Experimental Study on Bond Behavior between Concrete and FRP Reinforcement // *Journal of Composites for Construction*. 2008. Vol. 12. No. 2. Pp. 180-189.
20. Teng J.G., Chen J.F. Debonding failures of RC beams strengthened with externally bonded FRP reinforcement: behaviour and modeling // *APFIS 2007*. 2007. Pp. 33-42.
21. Bokarev S.A., Kostenko A.N., Smerdov D.N., Nerovnykh A.A. Eksperimentalnye issledovaniia pri ponizhennykh i povyshennykh temperaturakh zhelezobetonnykh obraztsov, usilennykh polimernymi kompozitsionnymi materialami [Experimental studies of reinforced with polymer composites ferroconcrete specimens at low and high temperatures]. [Online]. *Internet-zhurnal «Naukovedenie»*. 2013. Vol. 3. System requirements: Adobe Acrobat Reader. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/94tvn313.pdf> (date of application: 08.12.2022).
22. Polskoy P.P., Vasilenko N.V., Meretukov Z.A. O vliianii modul'ia uprugosti kompozitnykh materialov na prochnost i deformativnye svoistva usilennykh konstrukttsii [Effect of the FRP elastic modulus on the strength and deformation properties of RC structures]. [Online]. *Elektronnyi nauchnyi zhurnal «Inzhenernyi vestnik Dona»*. 2019. Vol. 8. System requirements: Adobe Acrobat Reader. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-vliyanii-modulya-uprugosti-kompozitnykh-materialov-na-prochnost-i-deformativnye-svoystva-usilennykh-konstrukttsiy/viewer> (date of application: 08.12.2022). (rus).
23. Smerdov D.N., Yashchuk M.O. Eksperimentalnye issledovaniia nesushchei sposobnosti izgibaemykh zhelezobetonnykh elementov, usilennykh prednapriazhennymi polimernymi kompozitsionnymi materialami

[Experimental studies of the load-carrying capacity of flexible reinforced concrete elements strengthened by prestressed polymer composites]. Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2019. Vol. 3. No. 55. Pp. 72-83. (rus). doi: 10.25987/VSTU.2019.55.3.008

24. Zhang Ah., Jin Wl., Li Gb. Behavior of preloaded RC beams strengthened with CFRP laminates. J. Zhejiang Univ. - Sci. 2006. Vol. 7. No. 3. Pp. 436-444. <https://doi.org/10.1631/jzus.2006.A0436>

25. Parikh K. Modhera C.D. Application of GFRP on preloaded retrofitted beam for enhancement in flexural strength. International journal of civil and structural engineering. 2012. Vol. 2. No. 4. Pp.1070-1080.

26. Rimshin V.I., Merkulov S.I., Esipov S.M. Betonnye konstrukticii, usilennye kompozitnym materialom [Concrete structures reinforced by composite material]. Vestnik Inzhenernoi shkoly DVFU, FEFU: School of Engineering Bulletin. 2018. Vol. 2. No. 35. Pp. 93-100. (rus). doi.org/10.5281/zenodo.1286034

27. Bykov A., Shardakov I., Shestakov A. Determination of thermography modes for recording delamination between composite material and reinforced concrete structures // Diffusion and Defect Data Pt.B: Solid State Phenomena. 2015. No. 243. Pp. 97-104. doi:[10.4028/www.scientific.net/SSP.243.97](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.243.97)

28. ACI 440.2R-08. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. ACI. 2008.

29. CNR-DT 200/2004. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures. Rome. 2004.

30. Recommendations for Upgrading of Concrete Structures with Use of Continuous Fiber Sheet // Concrete Engineering Series 41. Japan Society of Civil Engineers. 2001.

31. Teng J.G., Smith S.T., Yao J., Chen J.F. Intermediate crack-induced debonding in RC beams and slabs. Construction and Building Materials. 2003. Vol. 17. Issues 6-7. Pp. 447-462.

32. Lu X.Z., Teng J.G., Ye L.P., Jiang J.J. Intermediate crack debonding in FRP-strengthened RC beams: FE analysis and strength model. Journal of Composites for Construction. 2007. No. 11(2). Pp.161-174. doi:[10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2007\)11:2\(161\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2007)11:2(161))

33. Said H., Wu Z. Evaluating and proposing models of predicting IC debonding failure // Journal of Composites for Construction. 2008. Vol. 12. Issue 3. Pp. 284-299. doi:[10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2008\)12:3\(284\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2008)12:3(284))

34. Russian Building Codes SP 164.1325800.2014. Usilenie zhelezobetonnykh konstrukticii kompozitnymi materialami. Pravila proektirovaniia [Reinforcement of reinforced concrete structures with composite materials. Design rules]. (rus).

35. Nerovnykh A.A. Avtoreferat. Sovershenstvovanie metodiki otcenki gruzopodemnosti zhelezobetonnykh proelnykh stroenii zheleznodorozhnykh mostov, usilennykh kompozitcionnymi materialami. [Abstract of the dissertation. Improving the methodology for assessing the load capacity of reinforced concrete superstructures of railway bridges reinforced with composite materials. Abstract. Improvement of the methodology for assessing the load capacity of reinforced concrete superstructures of railway bridges reinforced with composite materials]. Novosibirsk. 2013. (rus).

Информация об авторах:

Быков Антон Алексеевич

ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь, Россия, кандидат технических наук, доцент кафедры строительных конструкций и вычислительной механики.

E-mail: violentharpv@yandex.ru

Шардаков Игорь Николаевич

«Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук» - филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь, Россия, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией интеллектуального мониторинга.

E-mail: shardakov@icmm.ru

Шестаков Алексей Петрович

«Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук» - филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь, Россия, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник.

E-mail: shap@icmm.ru

Глот Ирина Олеговна

«Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук» - филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь, Россия, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник.

E-mail: glot@icmm.ru

Information about authors:

Bykov Anton A.

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia,
candidate of technical science, associate professor of the department of building structures and computational mechanics.

E-mail: violentharp@yandex.ru

Shardakov Igor N.

Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of Russian Academy of Science, Perm, Russia,
doctor of physical and mathematical sciences, professor, head of the Intelligent Monitoring Laboratory.

E-mail: shardakov@icmm.ru

Shestakov Aleksey P.

Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of Russian Academy of Science, Perm, Russia,
candidate of physical and mathematical sciences, researcher.

E-mail: shap@icmm.ru

Glott Irina O.

Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of Russian Academy of Science, Perm, Russia,
candidate of physical and mathematical sciences, senior researcher.

E-mail: glott@icmm.ru