Строительные материалы и изделия

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-3-14>

УДК 624.072.012

Н.В. Макарова, А.И. Комаров, В.Г. Цуприк

МАКАРОВА НАТАЛЬЯ ВАЛЕНТИНОВНА – к.т.н., старший научный сотрудник Лаборатории механики необратимого деформирования, SPIN: 5587-4462, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2581-8066>, ResercherID: Q-2525-2016, ScopusID: 35610298200, e-mail: maknat@bk.ru

Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН

КОМАРОВ АЛЕКСЕЙ ИГОРЕВИЧ – аспирант, e-mail: komarov.ai@dvfu.ru

ЦУПРИК ВЛАДИМИР ГРИГОРЬЕВИЧ – к.т.н., доцент, AuthorID: 845977, SPIN: 1999-1274, ScopusID: 6507239252, e-mail: tsuprik.vg@dvfu.ru

Политехнический институт (Школа)

Дальневосточный федеральный университет

Владивосток, Россия

Прочностные и деформационные свойства контакта композитной арматуры с мелкозернистым бетоном

Аннотация: В последнее время в строительной практике увеличилось использование композитной арматуры с применением различного типа волокон и полимеров, проводятся обширные экспериментальные исследования для оценки ее механических характеристик. Однако взаимодействие между арматурными стержнями и бетоном все еще плохо изучено из-за разнообразия материалов и типов поверхности. В статье представлены результаты испытаний сцепления арматурных стержней с мелкозернистым бетоном. Пять серий бетонных цилиндров с заанкеренными в них базальтопластиковыми и стеклопластиковыми стержнями, изготавливаемыми на предприятиях Приморского края, были испытаны на прямое выдергивание. Проведены также сравнительные испытания двух серий образцов со стальными стержнями из холодноотянутой проволоки классов В-I и Вр-I. В качестве исследуемых параметров рассматривались не только прочностные свойства границы сцепления, но и параметры кривых «напряжение–деформация» во всем диапазоне испытаний, включая ниспадающую ветвь. Деформации непосредственно в арматурном стержне фиксировались с помощью установленного на нем экстензометра. Анализ полученных данных показал, что на прочность сцепления влияет преимущественно шаг ребер на поверхности стержней периодического профиля. Установлено, что наибольшая прочность сцепления была у стержней с шагом ребер 15 и 20 мм. В то же время в образцах с такими стержнями отмечалась начальная высокая жесткость сцепления и практически отсутствие ниспадающей ветви на кривых «напряжение–деформация», что свидетельствует о хрупком характере нарушения сцепления по поверхности арматуры и бетона. Применение аналогичной арматуры в элементах строительных конструкций может привести к хрупкому разрушению до исчерпания их несущей способности, что крайне нежелательно. Прочность сцепления металлических стержней с бетоном оказалась ниже, чем у всех испытываемых стержней композитной арматуры. Таким образом, сделан вывод о достаточно высоком качестве представленных для исследования образцов композитной арматуры и перспективности ее использования в качестве альтернативы стальным стержням в железобетонных элементах. В то же время при разработке новых видов продукции необходимо учитывать не только прочность арматуры, но и ее совместную с бетоном работу в конструкции на всем протяжении эксплуатации, обеспечивая при этом требования норм проектирования по предельному напряжению сцепления.

Ключевые слова: композитная арматура, стеклопластиковая арматура, базальтопластиковая арматура, мелкозернистый бетон, сцепление арматуры с бетоном.

© Макарова Н.В., Комаров А.И., Цуприк В.Г., 2020

О статье: поступила: 08.05.2020; финансирование: бюджет ДВФУ.

Введение

Стальная арматура, используемая для усиления бетонных конструкций, подвержена коррозии, что отрицательно сказывается на долговечности конструкций, эксплуатируемых в условиях агрессивного воздействия окружающей среды. В последнее время значительно расширились ассортимент и область применения выпускаемой неметаллической полимерной арматуры, в первую очередь на основе минеральных волокон (АВП). Такая арматура не только более устойчива к коррозии, но значительно легче и прочнее, чем сталь даже с более низким модулем Юнга. Широкое использование АВП увеличилось благодаря уникальным качествам, таким как долговечность, коррозионная стойкость, электромагнитная прозрачность и т.д. [2, 4, 5, 7, 17]. Стержни АВП в настоящее время применяются в качестве армирования для бетонных конструкций, таких как мосты, фундаменты и морские сооружения, где коррозия стальной арматуры обычно приводила к значительному износу и необходимости восстановления [3, 8]. Первоначально в качестве волокон использовались стекло, арамид и углепластик. Композитная полимерная арматура на основе стекловолокна (АСП) в настоящее время является наиболее изученным материалом [10]. Рост спроса на АВП способствует разработке и появлению новых материалов, таких как арматура на основе базальтовых волокон (АБП). Достаточно большое количество экспериментальных исследований проведены для оценки физико-механических и других технологических характеристик [11, 16]. В результате разработаны стандартные методы испытаний для определения характеристик АВП, а на этой основе – национальные нормы по проектированию и изготовлению строительных конструкций с использованием армирования пластиковой арматурой.

Основой для расчетных моделей железобетонных конструкций является совместная работа бетона и арматуры, обеспечиваемая прочностью сцепления и силами трения. Прочность сцепления, в свою очередь, зависит от геометрических параметров периодического профиля стержней, деформации их поверхности, химической адгезии, длины анкеровки, способа приложения нагрузки и многих других факторов. Те же самые требования предъявляются и для неметаллического армирования. Было проведено значительное количество испытаний для изучения сцепления АВП стержней с бетоном [6, 8, 10, 11, 13, 14, 16, 18]. Однако механизм сцепления между арматурными стержнями и бетоном все еще плохо изучен из-за разнообразия применяемых материалов, способов изготовления и типов поверхности [11]. Кроме того, мы считаем, что для полного понимания эффектов сцепления должны учитываться многие факторы, такие как деформация поверхности, механическая анкеровка, химическая адгезия, длина заделки, диаметр, условия окружающей среды и нагрузки, рассмотренные в [3–5, 7, 8, 10, 16, 17].

В большинстве выполненных исследований было установлено, что геометрическая форма поверхности и ее состав оказывают наибольшее влияние на адгезионную прочность. Влияние структурных волокон на изменения механизма сцепления на границе между АСП стержнем и бетоном изучено в работе [14]. Было установлено, что режимы разрушения связи в значительной степени зависят от межфазного взаимодействия с арматурой. Экспериментальные результаты испытаний образцов АСП, заанкеренных в высокопрочные бетонные блоки, на выдергивание показали, что прочность сцепления обратно пропорциональна длине заделки [13]. Аналогичное исследование [6] показало влияние различных параметров, от которых зависит прочность сцепления, таких как длина заделки, тип, форма, характеристики поверхности и диаметр стержня. Результаты экспериментального исследования поведения сцепления ребристых стержней АСП (с различной, специально разработанной геометрией ребер) с бетоном представлены в [12]. Было показано, что в бетоне нормальной прочности характеристики сцепления и скольжения этих ребристых стержней изменяются в зависимости от комбинации расстояния между ребрами и высоты ребра.

Таким образом, значительное количество экспериментальных и аналитических исследований, а также опыт эксплуатации показали эффективность конструкций с применением АВП. Тем не менее технологические стандарты и нормативы по проектированию не могут учитывать

все разнообразие материалов и форм поверхности разных производителей.

Цель статьи – установить влияние различных материалов и параметров поверхности на совместную работу АВП стержней с бетоном во всем диапазоне деформирования и на этой основе сформулировать рекомендации по оптимальной форме поверхности для разработчиков новых видов аналогичной продукции.

Материалы и методы

Наш эксперимент проходил в Институте автоматизации и процессов управления ДВО РАН в марте 2020 г., образцы изготавливались в Дальневосточном федеральном университете (подробнее – далее). Были испытаны пять типов композитной арматуры, изготавливаемых либо поставляемых на рынок Приморского края (табл. 1). В качестве образцов приняты три типа ребристых стержней АСП (тип 1–3), в том числе один тип стержня с базальтовыми ребрами (тип 3). Также прошли испытания ребристые АБП стержни (тип 6) и АБП стержни с песчаной посыпкой в смоле на поверхности (тип 7). Для сравнительных испытаний взяты два вида стальных арматурных стержней из холодноотянутой проволоки по ГОСТ 6727-80: ребристой Вр-1 (тип 4) и гладкой В-1 (тип 5). Номинальный диаметр всех стержней составил $D=4$ мм. Свойства арматуры, представленной в нашем эксперименте, см. в табл. 2.

Таблица 1

Типы композитной арматуры

	1	2	3	6	7
Изображение
Производитель	ООО «Мастер Композит», г. Большой Камень	ООО НПК «Арматек», г. Пермь	ИП Кинжалова Н.К., г. Уссурийск	ООО «Мастер Композит», г. Большой камень	ИП Тимочук С.М., г. Находка
ГОСТ, ТУ	ТУ 5769-248-35354501-2007	ТУ 2296-001-60722703-2010	ГОСТ 31938-2012	ТУ 5769-248-35354501-2007	ГОСТ 31938-2012

Стандартный метод испытания сцепления композитной арматуры с бетоном по ГОСТ 31938 предусматривает выдергивание арматурного стержня из бетонного куба, причем в образец при бетонировании вокруг участка стержня устанавливается полихлоридвиниловая втулка. Однако в [1] показано, что граница втулки является концентратором напряжений и инициирует развитие трещины на контакте стержня с бетоном. Для исключения данного эффекта, а также для устранения растрескивания бетона в местах выхода стержней в образцах сделаны выемки радиусом 3 мм (рис. 1,а), как было предложено в [15]. Испытываемые образцы имели цилиндрическую форму диаметром 55 мм и высотой 65 мм. Бетон, использованный для изготовления образцов, мелкозернистый; прочность на одноосное сжатие составила 26,4 МПа в возрасте 28 дней. Длина контакта L для всех испытаний принята в пределах 45 ± 5 мм, что достаточно для минимизации влияния неоднородного распределения деформаций по длине стержня [9]. Образцы были изготовлены с использованием цемента Спасского цементного завода М400

Д0 и песка Раздольненского месторождения с фракцией 0,63 мм в лаборатории кафедры строительных конструкций и материалов Инженерной школы ДВФУ. Всего было испытано 7 серий образцов соответственно с 7 типами арматуры по 4–6 образцов в каждой серии.

Таблица 2

Физико-механические свойства арматурных стержней

Тип	Материал	Профиль поверхности	Высота ребра, мм	Шаг ребер, мм	Прочность на растяжение, МПа	Модуль деформации, GPa	Прочность на поперечный сдвиг, МПа)
1	АСП	Рёбристый	0.5–0.7	8	1070	54.20	221.70
2	АСП	Рёбристый	0.5	7	1162	55.00	194.00
3	АСП	Рёбристый	0.3	20	1016	67.82	202.00
4	Сталь	Рёбристый	0.25	3	710	200.00	210.00
5	Сталь	Гладкий	–	–	710	200.00	210.00
6	АБП	Рёбристый	0.5–0.7	15	1085	50.00	150.00
7	АБП	Песок	–	–	800	50.00	150.00

Испытания образцов на выдергивание арматуры проводились на универсальной испытательной машине Shimazu AGS-X 10 кН в Лаборатории механики необратимого деформирования ИАПУ ДВО РАН. Бетонные цилиндрические образцы, помещенные в жесткое устройство, устанавливались в захваты испытательной машины, как показано на рис. 1,а. Скорость нагружения составляла 0,1 кН/мин. Испытания проводились с фиксированием усилия нарушения сцепления P_{max} и дальнейшим перемещением стержня в образце при включении сил трения в работу. Кроме того, относительное удлинение стержней $\varepsilon\%$ также измерялось с помощью экстензометра, закрепленного на стержне.

Рис. 1. Испытание арматурного стержня на вырывание: а – схема испытания; б – испытательное оборудование.

Результаты и обсуждение

Прочность сцепления рассчитывалась как значение предельных касательных напряжений τ_{max} с использованием значения максимальной нагрузки, достигнутой при испытании образца P_{max} , в допущение равномерного распределения напряжений по длине стержня в бетоне: $\tau_{max} = \frac{P_{max}}{L\pi D}$. Средние значения предельных касательных напряжений τ_{max} , деформаций образца S и относительных деформаций стержня $\varepsilon\%$, соответствующие максимальным значениям P_{max} , представлены в табл. 3.

Таблица 3

Средние значения результатов эксперимента

Серия №	τ_{max} , (МПа)	S , (мм)	$\varepsilon\%$
1	9.44±0.53	5.32±1.28	1.09±0.32
2	8.08±0.04	5.23±1.64	1.18±0.30
3	14.18±1.43	7.48±2.15	1.30±0.24
4	5.82±0.94	2.27±0.18	0.10±0.02
5	2.78±0.51	0.99±0.37	0.06±0.01
6	12.68±1.54	5.04±0.11	1.40±0.26
7	6.17±0.73	1.70±0.42	0.44±0.08

Арматура из стеклопластика АСП с базальтовыми ребрами на поверхности (тип 3) и стержни АБП (тип 6) показали наиболее высокую прочность сцепления – 14,18 и 12,68 МПа соответственно. Но несколько образцов этого типа были разрушены в результате раскалывания, что характерно для хрупкого разрушения. Полученное среднее напряжение связи для арматурных стержней АСП типа 1 и типа 2 составило 9,44 и 8,08 МПа соответственно. Для стержней АБП с песком на поверхности (тип 7) среднее напряжение сцепления – 6,17 МПа.

Сравнение результатов испытаний стержней с ребрами на поверхности показало, что наиболее значимым фактором является расстояние между ребрами в отличие от высоты ребер и состояния поверхности. Самые большие значения сцепления были получены на стержнях АСП и АБП с шагом ребер 20 мм (тип 3) и 15 мм (тип 6). Влияние расстояния представлено в гистограмме на рис. 2. В то же время на основе результатов, представленных в [12], было установлено, что, наоборот, связь ребристых арматурных стержней увеличивалась с уменьшением расстояния между ребрами. Однако этот вывод был получен для тяжелого бетона с крупным заполнителем, поэтому для мелкозернистого бетона в дальнейшем необходимы дополнительные эксперименты для подтверждения данных результатов.

Были испытаны два типа стальных стержней, имеющих ребристую (тип 4) и гладкую поверхность (тип 5). Среднее значение полученной прочности сцепления составило 5,82 МПа для стержня с ребристой поверхностью и 2,78 МПа – с гладкой поверхностью, причем прочность сцепления у всех типов композитных стержней оказалась выше, чем у стальных.

В соответствии с требованиями СП 63.13330 для стальных стержней периодического профиля расчетное значение предельного напряжения сцепления R_{bond} может быть рассчитано по формуле

$$R_{bond} = 2,25 \eta_1 \eta_2 R_{bt}, \quad (1)$$

где R_{bt} – расчетное значение прочности бетона на растяжение;

η_1 – коэффициент, учитывающий качество сцепления;

η_2 – коэффициент, учитывающий диаметр стержня.

Приняв для мелкозернистого бетона класса В20 $R_{bt} = 0,9$ МПа минимальное значение $\eta_1 = 0,7$ и $\eta_2 = 1$, по формуле (1) получим $R_{bond} = 1,42$ МПа.

Аналогичные требования к прочности сцепления бетона с полимерной композитной неметаллической арматурой R_{bond} предъявляются и в СП 295.1325800.2017:

$$R_{bond} = 2,25 \eta_1 R_{bt}. \quad (2)$$

Здесь R_{bt} – расчетное сопротивление бетона осевому растяжению; η_1 – коэффициент, учитывающий влияние вида поверхности арматуры, принимаемый равным 1,5. В этом случае по формуле (2) определим $R_{bond} = 2,03$ МПа.

Рис. 2. Влияние расстояния между ребрами на прочность сцепления.

Таким образом, в соответствии с требованиями норм проектирования конструкций прочность сцепления всех испытанных в данном исследовании стержней достаточна для обеспечения надежной анкеровки арматуры в бетоне. Однако в ГОСТ311938 для композитной арматуры минимальное значение предела прочности сцепления с бетоном установлено $\tau_r=12$ МПа, в результате только образцы серий 3 и 6 соответствуют требованиям данного Стандарта.

Деформационные характеристики сцепления арматурных стержней с мелкозернистым бетоном были исследованы с использованием экспериментальных диаграмм «усилие–перемещение». Записанные для каждого образца семи серий зависимости $P-\Delta$ пересчитывались для получения диаграммы $\tau-s$ определением касательных напряжений на границе сцепления: $\tau = \frac{P}{L \cdot u}$, где P – усилие, L – длина контакта стержня с бетоном, u – периметр стержня. Здесь для сравнительного анализа при одинаковых характеристиках бетона и постоянном диаметре стержня приняты некоторые допущения. Так, за деформации s в зоне сцепления принято значение перемещения испытательного устройства Δ , что при жесткости машины и испытательного устройства, намного превышающей жесткость образца, даст незначительную погрешность. Также значения касательных напряжений τ определялись в предположении линейного характера эпюры напряжений в пределах длины сцепления L . Деформации непосредственно в арматурных стержнях анализировались с использованием зависимостей $\sigma-\epsilon$, полученных в результате испытаний. Примеры характерных для образцов серий диаграмм представлены на рисунках 3–7.

Рис. 3. Образец 1-3: а – диаграмма $\tau-s$; б – диаграмма $\sigma-\epsilon$.

Рис. 4. Образец 3-3: а – диаграмма τ - s ; б – диаграмма σ - ϵ .

Рис. 5. Образец 4-4: а – диаграмма τ - s ; б – диаграмма σ - ϵ .

Рис. 6. Образец 6-2: а – диаграмма τ - s ; б – диаграмма σ - ϵ .

Рис. 7. Образец 7-2:
а – диаграмма τ - s ; б – диаграмма σ - ϵ .

Участок диаграммы деформирования до пика характеризует жесткость связи как соотношение напряжений и деформаций. Именно это обеспечивает механизм совместного действия арматуры и бетона в конструкциях. Поведение связи всех типов арматурных стержней перед пиком является линейным на начальном участке. После достижения нагрузки 60–80% от максимальной кривые становятся нелинейными (рисунки 3,а–7,а). Для всех типов стержней до пикового уровня нагрузки относительные растягивающие деформации являются упругими, а кривая – линейной (рис. 3,б – 7,б).

Когда нагрузка достигает своего максимального значения P_{max} , между бетоном и стержнем образуется зона нарушения связи, причем это может быть как растрескивание бетона, так и отслоение поверхностного слоя неметаллической арматуры. Послепиковый участок кривой диаграммы деформирования характеризует работу силы трения при сдвиге в зоне нарушенной связи.

После достижения пика на диаграмме испытания образца 1-3 (тип 1) в результате разрыва связей сцепления нагрузка резко снижается (до 40%), а затем снова увеличивается – примерно на 20% (по сравнению с первым пиком) за счет релаксации напряжений и включения в работу сил трения (рис. 3,а). Этот же скачок напряжений зафиксирован и в самом стержне (рис. 3,б). Небольшое послепиковое увеличение нагрузки при достаточно продолжительном отрезке деформирования наблюдалось при испытании образца 7-2 (тип 7) при упругой работе стержня (рис. 7,а,б). Аналогичный характер диаграммы был получен и при испытании металлического стержня периодического профиля (рис. 5,а), однако напряжения в стержне имели значительные колебания в результате микроскачков, характерных при трении поверхностей (рис. 5,б). Для этих трех типов стержней, имеющих невысокую прочность сцепления, послепиковая часть диаграммы деформирования достаточно развитая, нелинейная; вытягивание стержней происходило постепенно.

При испытании образца 3-3 (тип 3) пиковая нагрузка быстро падает, снижается до примерно 80–90% от максимальной нагрузки (рис. 4,а), это характерно для хрупкого разрушения с минимальным вкладом работы силы трения. Аналогичное поведение мы наблюдали и для образца 6-2 (тип 6), кроме того, было отмечено незначительное повторное увеличение нагрузки, которое, по всей видимости, связано с перераспределением напряжений послепиковой нагрузки вдоль стержня (рис. 6,а). Для этих двух типов стержней с высокой прочностью сцепления ниспадающая ветвь круто опускается вниз при незначительных деформациях, что характерно при хрупком разрушении. Следует заметить, что несколько бетонных цилиндров таких образцов разрушились хрупко от раскалывания на две части.

Таким образом, полученные в процессе испытаний диаграммы деформирования образцов представляют возможность анализа работы зоны контакта арматурных стержней с бетоном с целью проектирования оптимальных профилей АВП для определенных областей применения.

Выводы

Пять серий бетонных цилиндров с заанкеренными в них базальтопластиковыми (АБП) и стеклопластиковыми (АСП) стержнями диаметром 4 мм были испытаны на прямое выдергивание. В качестве исследуемых параметров рассматривались не только прочностные свойства поверхности сцепления, но и параметры процесса выдергивания во всем диапазоне испытаний, включая ниспадающую ветвь по кривым «напряжение–деформация». Деформации непосредственно в арматурном стержне фиксировались с помощью установленного на арматурном стержне экстензометра.

Результаты испытаний сцепления АБП и АСП стержней с мелкозернистым бетоном методом осевого выдергивания показали хорошее качество сцепления, достаточное для использования в качестве арматуры для несущих бетонных конструкций. Однако прочность сцепления только двух видов АВП стержней оказалась соответствующей требованиям ГОСТ

311938, несмотря на то что все испытываемые стержни АВП показали более прочное сцепление по сравнению с металлическими стержнями такого же диаметра. Это может быть связано с отсутствием крупного заполнителя в бетоне. Но, на наш взгляд, требования ГОСТ 311938 могут быть несколько завышены и не соответствуют нормам по расчету конструкций, поскольку в них не учитываются тип и класс бетона, а также метод испытания.

Наибольшая прочность сцепления была получена при испытании стержней АСП с базальтовым ребром производства ИП Кинжалова Н.К. г. Уссурийск (тип 3) и АБП производства ООО «Мастер Композит» г. Большой камень (тип 6). Установлено, что эти стержни имели шаг ребер на поверхности 15 и 20 мм соответственно, тогда как у других стержней шаг ребер был меньше. Другие параметры, такие как материал матрицы арматуры, высота ребер, в проведенном исследовании существенного влияния на максимальное усилие выдергивания не показали. Однако анализ диаграмм деформирования указывает на механизм хрупкого нарушения сцепления при высокой прочности арматуры, что может привести к нежелательному хрупкому растрескиванию конструкции во время работы. Образцы с низкой прочностью сцепления (больше, чем у стальных стержней) показали пластический характер процесса выдергивания, но с включением в работу сил трения. Наиболее однозначно это было выражено на диаграмме деформирования АБП стержня с шероховатостью в виде песчаной посыпки в смоле на поверхности арматуры производства ИП Тимочук С.М. г. Находка (тип 7). Следует отметить, что изучение процесса деформирования зоны сцепления с использованием кривых «напряжение–деформация» в течение всего цикла нагружения дает результаты, определяющие путь дальнейших исследований.

Поскольку в данной работе исследовались характеристики прочности сцепления разных типов стержней одинакового диаметра с мелкозернистым бетоном одного состава, полученные выводы в дальнейшем должны быть уточнены для бетонов с другими параметрами, а также непосредственно в элементах конструкций. Это будет способствовать внедрению новых разработок продукции с соответствующими уточнениями в стандарты и нормы проектирования.

Вклад авторов в статью: Н.В. Макарова – выбор метода, составление плана эксперимента, проведение и анализ данных эксперимента, выводы, перевод источников, ответственность за целостность всех частей статьи; А.И. Комаров – изготовление образцов, проведение экспериментов, обработка данных эксперимента, анализ результатов; В.Г. Цуприк – проблематика, поставка задачи, общее руководство, составление плана эксперимента, конструирование оборудования для испытаний, выводы. Все авторы – редактирование текста и утверждение окончательного варианта статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бенин А.В., Семенов А.С., Семенов С.Г., Мельников Б.Е. Математическое моделирование процесса разрушения сцепления арматуры с бетоном. Ч. 1. Модели с учетом несплошности соединения // Инженерно-строительный журнал. 2013. №. 5. С. 86. URL: <https://elibr.-spbstu.ru/dl/2/3382.pdf/info> (дата обращения: 10.04.2020).
2. Бронников И.В. Композитная арматура – проблемы и перспективы применения // Integral. 2019. № 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kompozitnaya-armatura-problemy-i-perspektivy-primeneniya> (дата обращения: 15.04.2020).
3. Завгороднев А.В., Уманский А.М., Беккер А.Т., Борисов Е.К. Перспективы применения композитной арматуры в морском гидротехническом строительстве // Горный информационно-аналитический бюллетень (ГИАБ). 2014. № S4–9. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-primeneniya-kompozitnoy-armatury-v-morskom-gidrotehnicheskom-stroitelstve> (дата обращения: 06.04.2020).
4. Лапшинов А.Е. Перспективы применения неметаллической композитной арматуры в качестве рабочей ненапрягаемой в сжатых элементах // Вестник МГСУ. 2015. № 10. С. 96–105. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-primeneniya-nemetallicheskoy-kompozitnoy-armatury-v-kachestve-rabochey-nenapryagaemoy-v-szhatyh-elementah> (дата обращения: 15.04.2020).

5. Теплова Ж.С., Киски С.С., Стрижкова Я.Н. Стеклопластиковая арматура для армирования бетонных конструкций // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. № 9. С. 49–70. URL: http://unistroy.spb.ru/index_2014_24/5_teplova_24.pdf (дата обращения: 15.04.2020).
6. Achillides Z., Pilakoutas K. Bond behavior of fiber reinforced polymer bars under direct pullout conditions. *Journal of Composites for construction*. 2004;8(2):173–181. URL: https://www.researchgate.net/publication/248879065_Bond_Behavior_of_Fiber_Reinforced_Polymer_Bars_under_Direct_Pullout_Conditions – 15.04.2020.
7. Behnam B., Eamon C. Reliability-based design optimization of concrete flexural members reinforced with ductile FRP bars. *Construction and Building Materials*. 2013;47:942–950. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061813004996> – 15.04.2020.
8. Benmokrane B., Ali A.H. Durability of FRP rebars in aggressive environments. *Proceedings of 8th International Conference on Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites in Civil Engineering (CICE2016)*. 2016. URL: https://scholar.google.ru/scholar?cluster=3163358702633781564&hl=ru&as_sdt=0,5 – 8.04.2020.
9. Cosenza E. Bond between glass fiber reinforced plastic reinforcing bars and concrete-Experimental analysis. *Special Publication*. 1999;188:347–358. URL: https://www.researchgate.net/publication/262260072_Bond_between_Glass_Fiber_Reinforced_Plastic_Reinforcing_Bars_and_Concrete_-_Experimental_Analysis – 15.04.2020.
10. Elgabbas F. Development and characterization of basalt FRP reinforcing bars for concrete structures. *Proceedings of the 7th Intern. Conf. on FRP Composites in Civil Engineering*. Vancouver, Canada, August 20–22, 2014. Intern. Institute for FRP in Construction (CICE). 2014, p. 20–22. URL: https://www.researchgate.net/publication/271078608_Development_and_Characterization_of_Basalt_FRP_Reinforcing_Bars_for_Concrete_Structures – 15.04.2020.
11. Elgabbas F., Ahmed E. A., Benmokrane B. Physical and mechanical characteristics of new basalt-FRP bars for reinforcing concrete structures. *Construction and Building Materials*. 2015;95:623–635. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061815300660> – 15.04.2020.
12. Hao Qingduo, Wang Yanlei, He Zheng, Ou Jinping. Bond strength of glass fiber reinforced polymer ribbed rebars in normal strength concrete. *Construction and Building Materials*. 2009;23(2):865–871. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061808001098> – 15.04.2020.
13. Islam S. Bond characteristics of straight-and headed-end, ribbed-surface, GFRP bars embedded in high-strength concrete. *Construction and Building Materials*. 2015;83:283–298. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095006181500272X> – 15.04.2020.
14. Kim Byungil, Don Jeung-Hwan, Yi Chonghu, Lee Jaemin. Effects of structural fibers on bonding mechanism changes in interface between GFRP bar and concrete. *Composites. Part B: Engineering*. 2013;45(1):768–779. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359836812005884> – 15.04.2020.
15. Makarova N.V., Makarov S.V. Femtosecond laser nanostructuring of reinforcement bars surface for improvement of its interaction with concrete. *J. of Physics: Conference Series*. IOP Publishing. 2018;1092(1):012082. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1092/1/012082/meta> – 15.04.2020.
16. Monaldo E., Nerilli F., Vairo G. Basalt-based fiber-reinforced materials and structural applications in civil engineering. *Composite Structures*. 2019(214):246–263. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822318342259?via%3Dihub> – 15.04.2020.
17. Portnov G., Bakis C.E., Lackey E., Kulakov V. FRP reinforcing bars – designs and methods of manufacture (review of patents). *Mechanics of Composite Materials*. 2013;49(4):381–400. URL: <https://pennstate.pure.elsevier.com/en/publications/frp-reinforcing-bars-designs-and-methods-of-manufacture-review-of> – 15.04.2020.
18. Wang Huanzi, Belarbi A. Static and Fatigue Bond Characteristics of FRP Rebars Embedded in Fiber-reinforced Concrete. *J. of Composite Materials*. 2010;44(13):1605–1622. URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0021998309355845?icid=int.sj-full-text.similar-articles.2&> – 15.04.2020.

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-3-14>

Makarova N., Komarov A., Tsuprik V.

NATALIA MAKAROVA, Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher,
Laboratory of Irreversible Deformation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2581-8066>,
ResercherID: Q-2525-2016, ScopusID: 35610298200, e-mail: maknat@bk.ru
Institute of Automation and Control Processes of Far Eastern Branch of RAS
Vladivostok, Russia

ALEXEY KOMAROV, Postgraduate, e-mail: komarov.ai@dvfu.ru

VLADIMIR TSUPRIK, Candidate of Engineering Sciences, ScopusID: 6507239252,
e-mail: tsuprik.vg@dvfu.ru

Politechnical Institute

Far Eastern Federal University

Vladivostok, Russia

Strength and deformation properties of the contact of composite reinforcement with fine-grained concrete

Abstract: At the time being, the use of composite reinforcement with inclusion of various types of fibers and polymers has increased in construction practice; extensive experimental studies are being conducted to assess its mechanical characteristics. However, the interaction between reinforcing bars and concrete is still poorly understood due to the diversity of materials and surface types. This paper presents the results of tests to study the bond behavior of FRP bars with fine-grained concrete. Five series of concrete cylinders with basalt-plastic embedded in them and fiberglass bars produced at industrial enterprises of the Primorsky Krai were tested for direct pulling. For comparison, two series of samples with steel bars of cold-drawn wire of classes B-I and Bp-I have also been tested. As the parameters studied, not only the strength properties of the adhesion boundary have been considered, but also the parameters of the stress-strain curves in the entire test range, including the descending branch. Deformations directly in the reinforcing bar have been recorded using an extensometer mounted on the reinforcing bar. Subsequent data analysis showed that the bond strength was mainly affected by the pitch of the ribs on the surface of the rods. It was found that the greatest bond strength was in the rods with a step of ribs of 15–20 mm. At the same time, in samples with such rods, initial high bond stiffness and almost no descending branches on the stress-strain curves were noted, which indicates brittle nature of bond failure. The use of similar reinforcement in the elements of building structures can lead to brittle fracture until their bearing capacity is exhausted, which is extremely undesirable. The bond strength of metal rods to concrete was lower than that of all tested rods of composite reinforcement bars. Thus, it was concluded that the quality of the FRP samples presented for the study and the prospects of using composite reinforcement as an alternative to steel bars in reinforced concrete elements are sufficiently high. At the same time, when developing new types of products, it is necessary to consider not only the strength of the reinforcement bar, but also its joint work with concrete in the structure throughout the entire operation, while ensuring the requirements of the Codes for ultimate adhesion stress.

Keywords: composite reinforcement, fiberglass reinforcement, basalt-plastic reinforcement, fine-grained concrete, bond between reinforcement and concrete.

REFERENCES

1. Benin A., Semenov A., Semenov S., Melnikov B. Simulation of degradation of bond between reinforcing bar and concrete. Part 1. Models with account of the discontinuity. Magazine of Civil Engineering. 2013(5):86. URL: <https://elib.spbstu.ru/dl/2/3382.pdf/info> – 15.04.2020.
2. Bronnikov I.V. Composite reinforcement – problems and prospects applications. J. of Appl. Science and Techn. *Integral*. 2019(3):223–228. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kompozitnaya-armatura-problemy-i-perspektivy-primeneniya> – 15.04.2020.

3. Zavgorodnev A.V., Umanskiy A.M., Bekker A.T., Borisov E.K. Prospects of FRP bars application marine hydraulic construction. Mining Informational and Analytical Bulletin (MIAB). 2014(S4-9). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-primeneniya-kompozitnoy-armatury-v-morskom-gidrotehnicheskom-stroitelstve> – 06.04.2020.
4. Lapshinov A.E. Prospects of Potential Application of Non-Metallic FRP Reinforcement in FRP-Reinforced Concrete Compressive Members as Main Longitudinal Non-Prestressed Reinforcement. Proc. of Moscow State University of Civil Engineering. 2015(10):96–105. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-primeneniya-nemetallicheskoj-kompozitnoy-armatury-v-kachestve-rabochej-nenapryagaemoy-v-szhatyh-elementah> – 15.04.2020.
5. Teplova Z.S., Kiski S.S., Strizhkova Y.N. Fiberglass reinforcement for armouring of concrete structures. Construction of Unique Buildings and Structures. 2014(24):49–70. URL: http://unistroy.spb.ru/index_2014_24/5_teplova_24.pdf – 15.04.2020.
6. Achillides Z., Pilakoutas K. Bond behavior of fiber reinforced polymer bars under direct pullout conditions. Journal of Composites for construction. 2004;8(2):173–181. URL: https://www.researchgate.net/publication/248879065_Bond_Behavior_of_Fiber_Reinforced_Polymer_Bars_under_Direct_Pullout_Conditions – 15.04.2020.
7. Behnam B., Eamon C. Reliability-based design optimization of concrete flexural members reinforced with ductile FRP bars. Construction and Building Materials. 2013;47:942–950. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061813004996> – 15.04.2020.
8. Benmokrane B., Ali A.H. Durability of FRP rebars in aggressive environments. Proceedings of 8th International Conference on Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites in Civil Engineering (CICE2016). 2016. URL: https://scholar.google.ru/scholar?cluster=3163358702633781564&hl=ru&as_sdt=0,5 – 8.04.2020.
9. Cosenza E. Bond between glass fiber reinforced plastic reinforcing bars and concrete-Experimental analysis. Special Publication. 1999;188:347–358. URL: https://www.researchgate.net/publication/262260072_Bond_between_Glass_Fiber_Reinforced_Plastic_Reinforcing_Bars_and_Concrete_Experimental_Analysis – 15.04.2020.
10. Elgabbas F. Development and characterization of basalt FRP reinforcing bars for concrete structures. Proceedings of the 7th Intern. Conf. on FRP Composites in Civil Engineering, Vancouver, Canada, August 20–22, 2014. Intern. Institute for FRP in Construction (CICE). 2014, p.20–22. URL: https://www.researchgate.net/publication/271078608_Development_and_Characterization_of_Basalt_FRP_Reinforcing_Bars_for_Concrete_Structures – 15.04.2020.
11. Elgabbas F., Ahmed E. A., Benmokrane B. Physical and mechanical characteristics of new basalt-FRP bars for reinforcing concrete structures. Construction and Building Materials. 2015;95:623–635. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061815300660> – 15.04.2020.
12. Hao Qingduo, Wang Yanlei, He Zheng, Ou Jinping. Bond strength of glass fiber reinforced polymer ribbed rebars in normal strength concrete. Construction and Building Materials. 2009;23(2):865–871. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061808001098> – 15.04.2020.
13. Islam S. Bond characteristics of straight-and headed-end, ribbed-surface, GFRP bars embedded in high-strength concrete. Construction and Building Materials. 2015;83:283–298. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095006181500272X> – 15.04.2020.
14. Kim Byungil, Don Jeung-Hwan, Yi Chonghu, Lee Jaemin. Effects of structural fibers on bonding mechanism changes in interface between GFRP bar and concrete. Composites. Part B: Engineering. 2013;45(1):768–779. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359836812005884> – 15.04.2020.
15. Makarova N.V., Makarov S.V. Femtosecond laser nanostructuring of reinforcement bars surface for improvement of its interaction with concrete. J. of Physics: Conference Series. – IOP Publishing. 2018;1092(1):012082 URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1092/1/012082/meta> – 15.04.2020.
16. Monaldo E., Nerilli F., Vairo G. Basalt-based fiber-reinforced materials and structural applications in civil engineering. Composite Structures. 2019(214):246–263. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822318342259?via%3Dihub> – 15.04.2020.
17. Portnov G., Bakis C.E., Lackey E., Kulakov V. FRP reinforcing bars – designs and methods of manufacture (review of patents). Mechanics of Composite Materials. 2013;49(4):381–400. URL: <https://pennstate.pure.elsevier.com/en/publications/frp-reinforcing-bars-designs-and-methods-of-manufacture-review-of> – 15.04.2020.
18. Wang Huanzi, Belarbi A. Static and Fatigue Bond Characteristics of FRP Rebars Embedded in Fiber-reinforced Concrete. J. of Composite Materials. 2010;44(13):1605–1622. URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0021998309355845?icid=int.sj-full-text.similar-articles.2&> – 15.04.2020.