

Интернет-журнал «Наукovedение» ISSN 2223-5167 <http://naukovedenie.ru/>

Том 7, №4 (2015) <http://naukovedenie.ru/index.php?p=vol7-4>

URL статьи: <http://naukovedenie.ru/PDF/11TVN415.pdf>

DOI: 10.15862/11TVN415 (<http://dx.doi.org/10.15862/11TVN415>)

УДК 624.072.012

Зиннуров Тагир Альмирович

ФГБОУ ВПО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет»
Россия, Казань¹

Старший преподаватель
Кандидат технических наук
E-mail: leongar@mail.ru

Пискунов Александр Алексеевич

ФГБОУ ВПО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет»
Россия, Казань

Профессор
Заведующий кафедрой «Мосты транспортные тоннели и геодезия»
Доктор технических наук
E-mail: piskunov52@mail.ru

Сафиюлина Луиза Гафуровна

ООО «ИТЦ Мосты»
Россия, Казань
Главный инженер проекта
E-mail: lui14@mail.ru

Петропавловских Ольга Константиновна

ФГБОУ ВПО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет»
Россия, Казань

Старший преподаватель
E-mail: olga_konst@mail.ru

Яковлев Денис Геннадьевич

ФГБОУ ВПО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет»
Россия, Казань

Студент
E-mail: tat11652@mail.ru

Численное моделирование сцепления композитной арматуры с бетоном

¹ 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

Аннотация. Композитная арматура является хорошей альтернативой металлической, за её высокую прочность на растяжение, диэлектрические свойства, а также высокую коррозионную стойкость, однако область её применения ограничивается, в связи с её низким модулем деформации и сцеплением с бетоном. Главной целью работы является разработка и анализ численной модели взаимодействия композитной арматуры с бетоном, для возможности дальнейшего моделирования работы пластикобетонных (полимеркомпозитных) конструкций транспортных сооружений.

В ходе исследования авторами проведено ряд экспериментов выдергивания «опесчаненного» стеклопластикового стержня из куба (Pull-out test) согласно ГОСТ 31938-2012, которые помогли оценить предел прочности сцепления стеклопластиковой арматуры с бетоном. По результатам была построена зависимость «выдергивающая сила – проскальзывание арматуры относительно бетона», в ходе исследований проанализировано множество существующих моделей сцепления металлической арматуры, но для аппроксимации данной зависимости предложена линейно-кусочная функция, которая дальнейшем использована для реализации численной модели на основе линейных связей с конечной жесткостью. Результаты численных экспериментов, выполненные по данной модели, хорошо согласуются с экспериментальными данными при достаточном количестве введенных линейных связей.

Ключевые слова: композитная арматура; стеклопластик; сцепление арматуры с бетоном; численное моделирование; линейные связи; модель из конечных элементов; касательные напряжения.

Ссылка для цитирования этой статьи:

Зиннуров Т.А., Пискунов А.А., Сафиюлина Л.Г., Петропавловских О.К., Яковлев Д.Г. Численное моделирование сцепления композитной арматуры с бетоном // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 7, №4 (2015) <http://naukovedenie.ru/PDF/11TVN415.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/11TVN415

1. Введение. Композитная арматура занимает все более прочные позиции в современном строительстве. Это обусловлено такими показателями, как высокая прочность, высокая коррозионная стойкость, низкая теплопроводность и другими полезными свойствами арматуры. Перечисляя преимущества необходимо отметить и недостатки. Основным недостатком композитной арматуры является низкий модуль деформации, который ближе к бетону, чем к стали, что замедляет включение композитной арматуры в работу. Другой серьезный недостаток - слабая адгезия между молекулами бетона и композитной арматурой, что снижает сцепление между материалами [1,3]. Для решения данных проблем, на сегодняшний день создана широкая номенклатура композитной арматуры, где для сцепления бетона с арматурой применяется роулинг со стеклопластиковым, базальтопластиковым и углепластиковым волокном, создание различных видов искусственных неровностей на поверхности арматуры, такие как различные виды обмоток или песчаный слой из кварцевого песка [1].

Известно, что взаимодействие бетона и арматуры, как единого целого происходит за счёт трёх факторов [2,3]: механическое зацепление арматуры за бетон, при наличии неровностей на поверхности арматуры, трение между бетоном и арматурой, молекулярное взаимодействие (адгезия). Описание сложного многопараметрического взаимодействия бетона и композитной арматуры характеризует кривая зависимости «напряжения сцепления – проскальзывание арматуры относительно бетона», или альтернативная зависимость «выдергивающая сила – проскальзывание арматуры относительно бетона» [4,5]. Построить такую кривую можно используя экспериментальный метод выдергивания стержня из куба (Pull-out test) согласно ГОСТ 31938-2012 более известный как RILEM/CEB/FIB.

2. Натурный эксперимент. Авторами проведен эксперимент по 5 образцам стеклопластиковой “опесчаненной” арматуры (СПА) диаметром 6 мм по техническим условиям фирмы ООО “Фрима” на испытательной установке показанной на рисунке №1. Установка представляет собой подвижную и неподвижную платформу, выдергивающее усилие создается за счёт гидравлического домкрата с плавностью хода 1 мм в минуту, перемещения арматуры фиксируются по индикаторам часового типа. В ходе подготовки эксперимента были залиты образцы размерами 100x100x100 мм из мелкозернистого бетона класса В30, СПА имеет длину участка сцепления с бетоном $5d = 30$ мм. Оценка прочности сцепления в виде касательных напряжений τ вычисляется по формуле (Д.1) ГОСТ 31938-2012. Результаты испытаний образцов приведены в таблице 1 и на рисунке 2 в виде графика 1.

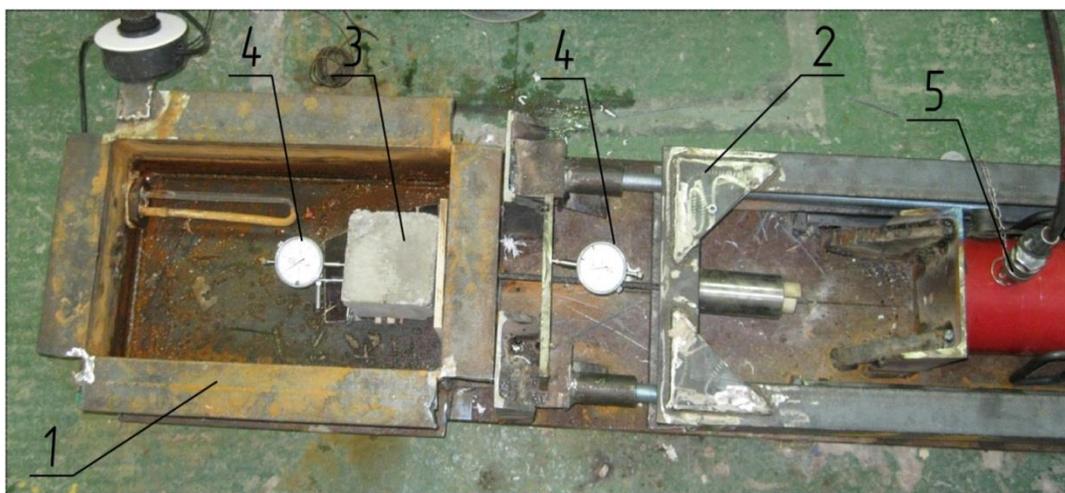


Рис. 1. Испытательная установка. 1 – неподвижная платформа; 2 – подвижная платформа; 3 – образец для испытания; 4 – два индикатора с ценой деления 0.01 мм; 5 – тяговое устройство. Фото сделано автором: Зиннуров Т.А.

Таблица 1

Результаты испытаний образцов

Номер образцов	Касательные напряжения τ , мПа	Максимальное смещение стержня до выдергивания Δ , мм	Выдергивающее усилие F , кН
1	11.85	0.4	6.70
2	10.70	0.45	6.05
3	11.50	0.46	6.50
4	10.61	0.38	6.00
5	11.23	0.45	6.35
Среднее	11.178	0.428	6.32

По результатам испытаний установлено, что разрушение всех образцов под действием выдергивающей силы происходит по граничному слою между бетоном и арматурой. В результате разрушается бетон, из-за ограниченности работы бетона на срез и растяжение, и частично песчаная обсыпка стеклопластиковой арматуры, из-за слабой связи между частицами песка и стеклопластиком. Распределение напряжений по поверхности сцепления происходит не равномерно, вследствие работы связующего композитной арматуры и неоднородности распределения песка по поверхности арматуры. При контакте двух материалов на небольших областях образуются зоны больших касательных напряжений, превышающих допустимые, что влечёт к срезу наиболее выступающих частиц песка из плоскости стержня и приводит к локальному проскальзыванию стержня [7,8]. Данное явление было зафиксировано при испытании образцов, в результате чего показания индикатора изменялись не плавно, а скачкообразно.

Диаграмма «выдергивающая сила – проскальзывание арматуры относительно бетона», полученная в результате эксперимента показана на графике 1 (рис. 2). В криволинейной зависимости перемещения стеклопластиковой арматуры Δ от выдергивающей силы четко можно выделить три зоны. Первая зона линейный участок графика $F(\Delta)$, когда при малых значениях выдергивающего усилия в бетоне происходят упругие деформации бетона, при снятии нагрузки арматура возвращается в первоначально положение. При дальнейшем увеличении силы F появляются сдвиговые трещины и участки с локальным проскальзыванием, что увеличивает скорость перемещения арматуры относительно бетона в зоне 2. Зона 3 истощение несущей способности бетона, арматура ещё имеет сцепление с бетоном за счёт не поврежденных участков и сил трения [2]. Нужно отметить, что подобные исследования арматуры уже проводились авторами [1] и результаты в целом, с некоторыми расхождениями из – за разных производителей арматуры, согласуются с ранее проведенными экспериментами.

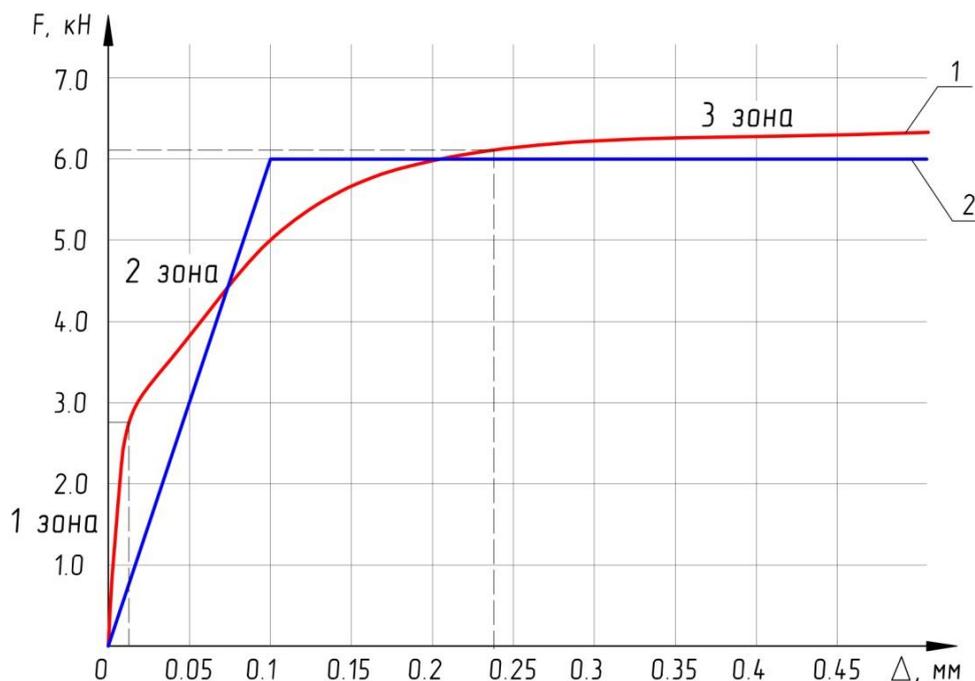


Рис. 2. Графики зависимости перемещения стеклопластиковой арматуры Δ от выдергивающей силы F , 1 – по результатам испытаний; 2 – для численного моделирования.
Рисунок составлен автором: Зиннуров Т.А.

3. Численное моделирование. Настоящей целью работы является предложить численную модель сцепления бетона с композитной арматурой (СПА) на основе КЭ, для дальнейшего использования при анализе и прогнозировании напряженно - деформированного состояния различных (полимеркомпозитных) конструкций транспортных сооружений. Поэтому потребуется сравнить и проанализировать уже разработанные модели взаимодействия бетона и металлической арматуры и предложить численную модель для стеклопластиковой арматуры, которая наиболее точно согласуется с эмпирическими данными, полученными в результате эксперимента и доступна для применения в более сложных конструкциях.

Известно 7 классов моделей сцепления бетона и арматуры [2,6,10]:

- модель идеального сцепления арматуры и бетона;
- модель с добавлением дополнительного слоя с пониженным модулем деформации;
- модель с использованием связей с конечной жесткостью;
- модель с исключением разрушенных элементов из работы;
- модель с учётом микрорастрескивания;
- модель упруго-поврежденного материала;
- модель с упруго – пластично – поврежденного материала.

Наибольшее распространение получили три первых модели, остальные модели требуют наличия программных комплексов высокого уровня, как ANSYS, Nastran, ABAQUS и другие.

Модель идеального сцепления арматуры и бетона не учитывает несплошность среды и микрорастрескивание, однако широко и повсеместно используется в численных расчётах железобетонных элементов, так как потеря несущей способности арматуры достигается быстрее, чем утрачивается сцепление между арматурой и бетоном. Это несложно доказать, если

приравнять выдергивающее усилие к несущей способности арматурного стержня - тогда получаем выражение:

$$\tau \cdot C_b \cdot l = R_f A_f,$$

где τ – среднее напряжение сцепления, C_b – эквивалентная окружность стержня из СПА, l – длина заделки в бетон, A_f – площадь арматуры, R_f – расчётное сопротивление композитной арматуры на растяжение. Момент потери несущей способности композитного стержня диаметром 6 мм и глубиной заделки 15 см в результате потери сцепления произойдёт при несущей способности арматуры R_f

$$R_f = \frac{\tau \cdot C_b \cdot l}{A_f} = 1200 \text{ мПа},$$

что больше сопротивления СПА на растяжение, полученного в результате эксперимента в 1100 мПа. Следовательно, данная модель состоятельна при оценке прочности конструкции, но недопустима при оценке деформации конструкций.

Модель с добавлением дополнительного слоя с пониженным начальным модулем деформации, требует более подробной дискретизации расчетной модели, а именно применения объемных конечных элементов с мелкой разбивкой сетки для бетона, арматуры и самого граничного слоя, что не позволительно для расчёта сложных расчётных схем, так как потребует больших временных затрат.

Модель, основанная на использовании связей с конечной жесткостью, считается наиболее логичной, а также имеет наибольшую согласованность с экспериментальными и теоретическими результатами сцепления металлической арматуры с бетоном [2]. Данная модель позволяет учитывать нелинейные смещения арматуры относительно бетона в процессе разрушения связей сцепления. Для численного описания модели требуется вводить дополнительные элементы с конечной жёсткостью или по-другому податливые связи. Авторами [2] предлагаются для использования нелинейные пружины, свойства которых описываются по диаграммам сцепления арматуры с бетоном. Не во всех расчётных комплексах доступен данный тип КЭ, поэтому необходимо упростить модель, а именно нелинейные пружины следует заменить линейными пружинами с предельным усилием на растяжение или сжатие. Тогда для аппроксимации нелинейной диаграммы сцепления арматуры, с бетоном, представленного на графике 1 (Рис. 2) предлагается использовать кусочно-линейную функцию, изображенную на графике 2 (Рис. 2), которая описывается формулой:

$$S(F) = \begin{cases} \frac{F}{\Delta}, & \text{при } F < F_{\text{выд}} \\ 0, & \text{при } F \geq F_{\text{выд}} \end{cases} \quad (1).$$

Тогда жесткость каждой связи назначается из условия

$$S(F) = F_{\text{выд}} / \Delta \cdot N,$$

где $F_{\text{выд}}$ – выдергивающее усилие; Δ – смещение арматуры относительно бетона; F – продольное усилие в арматуре; N – количество связей (пружин) в расчётной схеме. При достижении усилия в связях более $F_{\text{выд}}/N$ они выключаются из работы.

Далее в работе, при помощи предложенной модели на программном комплексе «ЛИРА» численными методами был воссоздан натурный эксперимент исследований сцепления СПА с бетоном. Расчётная модель экспериментального образца полностью состояла из объемных конечных элементов, характеристики для бетона задавались для класса В 30, для стеклопластиковой арматуры модуль деформации принят равный 55000 мПа, расчётное

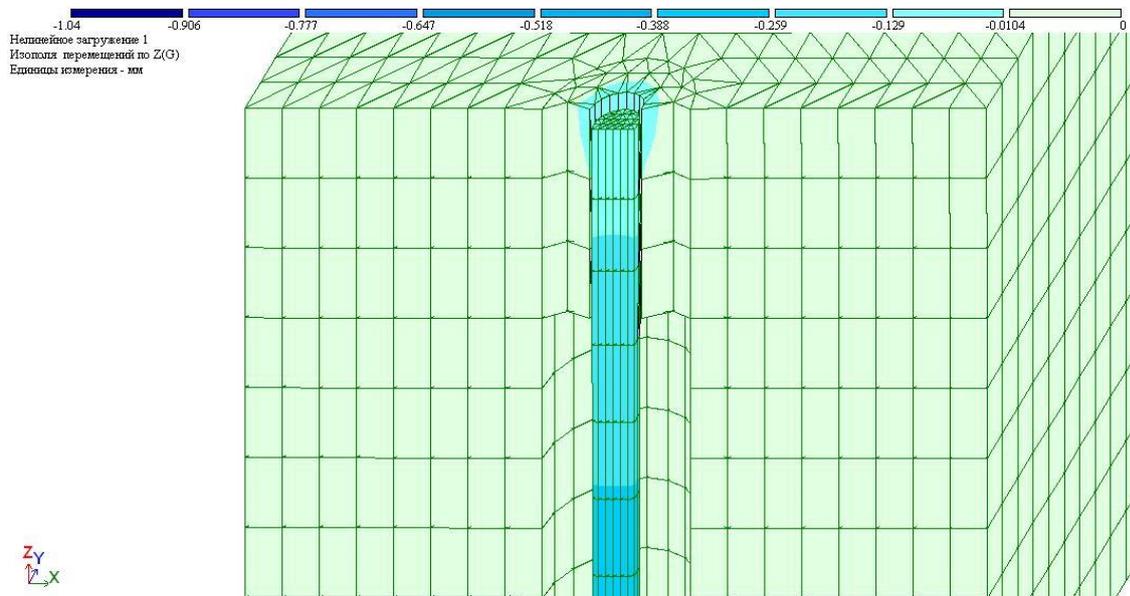
сопротивление на сжатие 800 мПа с предельными относительными деформациями 0.0035. задача решалась шаговым методом в нелинейной постановке, с конечной нагрузкой в 6 кН. Результаты моделирования, для расчётных схем с различным количеством вводимых линейных связей, представлены на рисунке 3 и таблице 2.

Таблица 2

Результаты моделирования, для расчётных схем с различным количеством вводимых линейных связей

Количество связей, шт.	40	60	80	100	120
Смещение арматуры относительно верхней грани бетонного кубика Δ , мм	0.1345	0.122	0.1156	0.1114	0.108
Деформации бетона Δ_b , мм	0.0172	0.0128	0.0104	0.0095	0.0063
Смещение арматуры относительно деформированного бетона Δ_c , мм	0.1173	0.1092	0.1052	0.1045	0.1017
Относительное отклонение результата от натурального эксперимента, %	34.5	22	15.6	11.4	8

а)



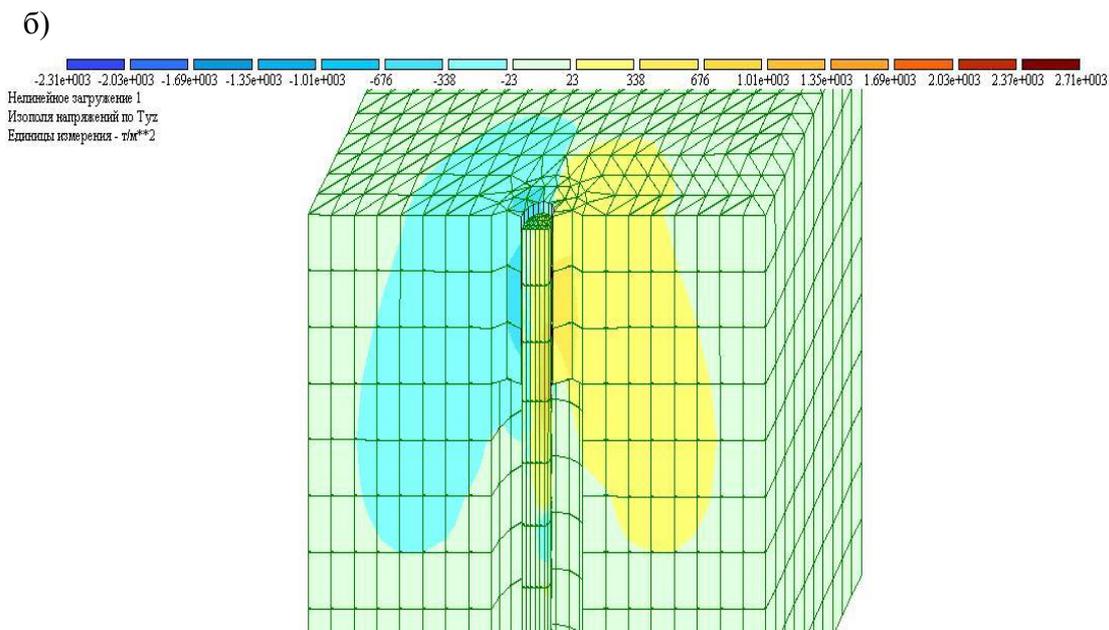


Рис. 3. Результаты численного моделирования сцепления композитной арматуры с бетоном
а) изополя смещения арматуры относительно бетона, б) изополя напряжений сцепления с бетоном. Рисунок составлен автором: Зиннуров Т.А.

Анализ полученных значений показывает, что кроме деформации самих связей присутствуют деформации бетона граничной зоны, которые в сумме и дают искомую величину смещения композитной арматуры относительно верхней грани бетона $\Delta = \Delta_b + \Delta_c$ (рис. 3). Разница между данными принятыми по натурному эксперименту в виде кусочно-линейной зависимости и численному эксперименту отличаются на величину относительного отклонения от 8% до 34.5% в зависимости от количества связей. То есть при увеличении количества водимых связей можно, во-первых, сократить деформации бетона Δ_b , во-вторых, увеличить сходимость между экспериментальным и численным показателем смещения арматуры относительно верхней грани Δ . Поэтому при решении конкретной задачи необходимо решать тестовые задачи, которые позволят определить величину требуемого количества связей, моделирующих сцепление арматуры с бетоном с нужной точностью.

4. Выводы.

- По результатам выполненных экспериментов на образцах построена диаграмма «выдергивающая сила – проскальзывание арматуры» “опесчаненной” композитной арматуры (СПА) диаметром 6 мм относительно бетона. Среднее осевое вырывающее усилие составило 6.32 кН, напряжение сцепления составило 11.178 мПа, что меньше нормативного [3].
- Для численного моделирования сцепления композитной арматуры с бетоном предлагается модель, на основе линейных связей с предельной жесткостью (пружинок), которая показала хорошую сходимость при моделировании сцепления металлической арматуры с бетоном. Для описания работы связи под нагрузкой предлагается использовать кусочно-линейную функцию (1), изображенную на графике 2 (Рис. 2), а жесткость каждой связи назначается из условия $S(F) = F_{\text{выд}}/\Delta \cdot N$. При достижении усилия в связях более $F_{\text{выд}}/N$ связи выключаются из работы.
- Количество вводимых связей прямо пропорционально влияет на точность численного эксперимента. Для дифференциации точности решаемых задач необходимо корректировать количество вводимых связей на тестовых задачах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хозин В.Г., Гизатуллин А.Р., Куклин А.Н., Пискунов А.А. Сцепление полимеркомпозитной арматуры с цементным бетоном // Известия КГАСУ. 2013. №1 (23). С. 211-213.
2. Бенин А.В., Семенов А.С., Семенов С.Г., Мельников Б.Е. Математическое моделирование процесса разрушения сцепления бетона с арматурой. Часть 1. Модели с учётом несплошности соединения // Инженерно - строительный журнал. 2013. №5. С. 86 – 99.
3. Фролов Н.П. Стеклопластиковая арматура и стеклобетонные конструкции. – М.: Стройиздат, 1980. – 104 с.
4. Климов Ю.А., Солдатенко О.С., Орешкин Д.А. Экспериментальные исследования композитной неметаллической арматуры с бетоном // URL: http://www.ekibar.org/files/frp_rebar_test_adhesion_concrete.pdf (дата обращения: 10.03.2015).
5. Бенин А.В., Семенов С.Г. Экспериментальные исследования сцепления композитной арматуры с плоской навивкой с бетоном // Промышленное и гражданское строительство. 2013. №9. С. 74-76.
6. Бенин А.В. Конечно-элементное моделирование процессов разрушения элементов железобетонных конструкций // Промышленное и гражданское строительство. 2011. №5, С. 16-20.
7. Холмянский М.М. Контакт арматуры с бетоном. М.: Стройиздат, 1981. 184 с.
8. Cruz J.S., Barros J. Modeling of bond between near-surface mounted CFRP laminate strips and concrete // Computer and Structures. 2004. No. 82. Pp. 1513 – 1521.
9. Римшин В.И., Кустикова Ю.О. Теоретические основы расчета сцепления стеклобазальтовой арматуры с бетоном // Известия Орловского государственного технического университета. -2009. - №2 (22). - С. 29-33.
10. Benin A.V., Semenov A.S., Semenov S.G. Modeling of facture process in concrete reinforced structures under steel corrosion // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. 2010. Vol. 39. Issue 2. Pp. 168 - 175.

Рецензент: Овчинников Игорь Георгиевич, профессор, доктор технических наук, ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Россия, Пермь, ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Россия, Саратов.

Zinnurov Tagir Almirovich

Kazan State University of Architecture and Engineering
Russia, Kazan
E-mail: leongar@mail.ru

Piskunov Aleksander Alekseevic

Kazan State University of Architecture and Engineering
Russia, Kazan
E-mail: piskunov52@mail.ru

Safiyulina Luiza Gafurovna

«ETC Bridges» Ltd.
Russia, Kazan
E-mail: lui14@mail.ru

Petropavlovskih Olga Konstantinovna

Kazan State University of Architecture and Engineering
Russia, Kazan
E-mail: olga_konst@mail.ru

Yakovlev Denis Gennadievic

Kazan State University of Architecture and Engineering
Russia, Kazan
E-mail: tat11652@mail.ru

Numerical modeling of bond composite reinforcement and concrete

Abstract. Composite reinforcement is a good alternative metal reinforcement for its high tensile strength, dielectric properties, and high corrosion resistance, but the range of its application is limited due to its low modulus of deformation and adhesion to concrete. The main objective is to develop and analyze the numerical model of composite reinforcement with concrete interaction, to allow further modeling work plastikconcrete (polimercomposite) construction of transport facilities.

In research, the authors conducted a series of experiments pulling with "sand" fiberglass rod from the bottom (Pull-out test) in accordance with GOST 31938-2012, who helped evaluate the limit of adhesion fiberglass reinforcement with concrete. According to the results plotted the "pull out force - slip reinforcement relatively concrete", the investigation analyzed a variety of existing models clutch metal reinforcement, but to approximate this dependence proposed piecewise linear function, which is used for the further implementation of the numerical model based on linear relationships with the ultimate rigidity. The results of numerical experiments performed on this model are in good agreement with the experimental data with enough input linear relations.

Keywords: composite reinforcement; fiberglass; bond composite reinforcement and concrete; numerical modeling; bond chart; the finite element model; shear stresses.

REFERENCES

1. Khosin V.G., Gizatullin A.R., Kuklin A.N., Piskunov A.A. Adhesion fiber-reinforced polymer bars with cement concrete // Известия КГАСУ. 2013. №1(23). С. 211-213.
2. Benin A.V., Semenov A.S., Semenov S.G., Melnikov B.E. Simulation of degradation of bond between reinforcing bar and concrete. Part 1. Models with account of the discontinuity // magazine of civil engineering. 2013. №5. P. 86 – 99.
3. Frolov N.P. Fiberglass rebar and concrete with fiberglass structures. – M: Stroizdat, 1980. – 104 p.
4. Klimov Yu.A., Soldstenko O.S., Oreshkin D.A. Experimental studies of non-metallic composite reinforcement with concrete // URL: http://www.ekibar.org/files/frp_rebar_test_adhesion_concrete.pdf (date: 10.03.2015).
5. Benin A.V., Semenov S.G. Experimental studies of adhesion of composite reinforcement with flat wound with concrete // Industrial and civil engineering. 2013. №9. P. 74 – 76.
6. Benin A.V. Finite - element simulation of destruction of reinforced concrete structures elements // Industrial and civil engineering. 2011. №5, P. 16 - 20.
7. Kholmianskiy M.M. Contact between concrete and reinforcement. Moscow: Stoyizdat, 1981. 184 p.
8. Cruz J.S., Barros J. Modeling of bond between near-surface mounted CFRP laminate strips and concrete // Computer and Structures. 2004. No. 82. Pp. 1513 – 1521.
9. Rimishin V.I., Kustikova Yu.O. Theoretical basis for calculating the bond composite reinforcement with concrete // Izvestia Orel state technical university. 2009. №2 (22). P. 29 – 33.
10. Benin A.V., Semenov A.S., Semenov S.G. Modeling of failure process in concrete reinforced structures under steel corrosion // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. 2010. Vol. 39. Issue 2. Pp. 168 - 175.