

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
ПОЛОЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНСТИТУТ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ВИЛЬНЮССКОГО ТЕХНИЧЕСКОГО  
УНИВЕРСИТЕТА им. ГЕДЕМИНАСА  
БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (УКРАИНА)  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ г. ЛЕЙРИИ (ПОРТУГАЛИЯ)  
АРИЭЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ (ИЗРАИЛЬ)  
ПЕРМСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ (РОССИЯ)  
ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (РОССИЯ)

**АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС:  
ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ, ИННОВАЦИИ**

Электронный сборник статей  
международной научной конференции,  
посвященной 50-летию Полоцкого государственного университета

(Новополоцк, 5-6 апреля 2018 г.)

Под редакцией  
канд. техн. наук, доцента А. А. Бакатовича;  
канд. техн. наук, доцента Л. М. Парфеновой

Новополоцк  
Полоцкий государственный университет  
2018

*Редакционная коллегия:*

А. А. Бакатович (председатель), Л. М. Парфенова (зам. председателя),  
А. С. Катульская (отв. секретарь), Е. Д. Лазовский,  
Т. И. Королева, В. Е. Овсейчик

**АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС: ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ, ИННОВАЦИИ** [Электронный ресурс] : электронный сборник статей международной научной конференции, посвященной 50-летию Полоцкого государственного университета, Новополоцк, 5–6 апр. 2018 г. / Полоцкий государственный университет ; под ред. А. А. Бакатовича, Л. М. Парфеновой. – Новополоцк, 2018. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

Рассмотрены вопросы архитектуры и градостроительства в современных условиях, прогрессивные методы проведения инженерных изысканий и расчета строительных конструкций. Приведены результаты исследований ресурсо- и энергосберегающих строительных материалов и технологий, энергоресурсосберегающие и природоохранные инновационные решения в инженерных системах зданий и сооружений. Рассмотрены организационные аспекты строительства и управления недвижимостью, проблемы высшего архитектурного и строительного образования.

Для научных и инженерно-технических работников исследовательских, проектных и производственных организаций, а также преподавателей, аспирантов, магистрантов и студентов строительных специальностей учреждений образования.

*Сборник включен в Государственный регистр информационного ресурса. Регистрационное свидетельство № 3671815379 от 26.04.2018.*

Компьютерный дизайн К. В. Чулковой, В. А. Крупенина.

Технический редактор О. П. Михайлова.

Компьютерная верстка Т. А. Дарьяновой.

211440, ул. Блохина, 29, г. Новополоцк, Беларусь  
тел. 8 (0214) 53 53 92, e-mail: a.bakatovich@psu.by; l.parfenova@psu.by

## ХАРАКТЕРИСТИКИ СЦЕПЛЕНИЯ КОМПОЗИТНОЙ АРМАТУРЫ С БЕТОНОМ В УСЛОВИЯХ СТАТИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

А.В. Замировский

Брестский государственный технический университет, Беларусь

email: studiaformanta@yandex.ru

*Проектирование конструкций с комбинированным армированием невозможно без описания характеристик сцепления композитной арматуры с бетоном. В статье выполнен обзор проблем, связанных с реализацией известных методик определения характеристик сцепления композитной арматуры, описана собственная методика испытаний и изложены результаты ее практического применения. В заключении доклада делаются выводы о возможности дальнейшего применения предложенной методики испытаний.*

*Ключевые слова: прочность сцепления арматуры с бетоном, композитная арматура, методика испытаний, испытательная установка.*

## BOND BEHAVIOR BETWEEN FRP REINFORCEMENT AND CONCRETE IN CONDITIONS OF STATIC LOADING

A. Zamirovski

Brest State Technical University, Belarus

email: studiaformanta@yandex.ru

*Design of structures with combined reinforcement is impossible without a description of the characteristics of bonding behavior between reinforcement and concrete. The article reviewed the problems associated with the implementation of existing testing methods of determining the bond characteristics of FRP; suggested own testing method; described the results of practical application of the described testing method. In the conclusion some issuers about the possibility of further application of the proposed testing method were figured.*

*Keywords: bond behavior between reinforcement and concrete, FRP tiles, test methodology, testing machine.*

**Введение.** В настоящее время предложено довольно много способов ингибирования коррозии стали в железобетонных конструкциях. В реальной практике производства эти способы оказываются неэффективными либо капиталоемкими [1]. В связи с этим для армирования конструкций из бетона, эксплуатирующихся в условиях агрессивной окружающей среды, а также конструктивных элементов зданий специального назначения, применяются композитные стержни (англ. *fiber-reinforced polymer composite* – FRP).

Очевидно, что элементы с комбинированным армированием имеют качественные преимущества над элементами, в которых используется исключительно металлическая либо неметаллическая арматура. За счет стальной арматуры повышаются жесткостные характеристики элемента и ограничивается ширина раскрытия трещин в эксплуатационной стадии. По мере нагружения, после достижения текучести в стальной арматуре, прирост усилия достигается за счет активного включения в работу неметаллической арматурой. [2]

При проектировании элементов с комбинированным армированием принимается так называемая блочная расчетная модель. При формулировании положений данной расчетной модели [3, 4] рассматривается блок, выделенный соседними трещинами. Статическая задача в общем случае решается с использованием модифицированных положений деформационной модели. Исходными данными при решении такой задачи является система уравнений (уравнения равновесия продольных сил, уравнения равновесия моментов, уравнения равновесия для отдельного стержня, уравнения для проскальзывания), которая в свою очередь дополняется диаграммами деформирования для материалов " $\sigma_c - \epsilon_c$ ", " $\sigma_s - \epsilon_s$ ", " $\sigma_f - \epsilon_f$ " и диаграммами, связывающими величину касательных напряжений  $\tau$  с величиной проскальзывания  $s$ .

В соответствии с ModelCode 2010 [5] приводится общий вид диаграммы " $\tau_f - s_f$ " с аналитическим описанием, а параметрические точки диаграммы, описывающей закон сцепления композитной арматуры с бетоном, могут быть определены исключительно опытным путем.

Известные методы определения характеристик сцепления композитной арматуры с бетоном, позволяющие определить значения параметрических точек, являются неточными либо малоэффективными. Так, например, широкое распространение получила методика «*pull-out test*», описанная в стандарте RILEM/CEB/FIB [6] (аналогичная по своим принципам методика изложена в Приложении Д ГОСТ 31938-2012 [7]). Популярность этой методики обусловлена, неявным образом, ее простотой.

Согласно методике образец представляет собой бетонный куб или призму, в который заделывается композитный арматурный стержень. Длина заделки принимается пропорциональной диаметру силового стержня. Образец устанавливается на неподвижную опорную стальную плиту. Между бетонным образцом и стальной пластиной предусмотрена прокладка из резины или древесины, основной функцией которой является устранение неровностей бетонной поверхности образца и сглаживание локальных контактных напряжений. Порядок проведения испытаний следующий: к свободному концу композитного стержня, параллельно его продольной оси, прикладывается усилие. Прикладываемое усилие увеличивают пропорционально на каждом этапе испытаний, фиксируя при этом смещения точек арматурного стержня.

К существенным недостаткам данной методики можно отнести то, что с ее применением испытание арматурных стержней больших диаметров невозможно. Кроме того, проведение эксперимента по методике «*pull-out test*» характеризуется повышенными экономическими затратами. Все эти факторы осложняют получение исходных данных, необходимых для проектирования конструкций с комбинированным армированием.

**Методика исследований.** С целью устранения вышеописанных недостатков на базе методики «*pull-out test*» была разработана усовершенствованная методика испытаний. Принципиальная схема реализации разработанной методики и аксонометрическая схема испытательной установки [8] изображены на рисунке 1.

В разработанной методике испытаний образец 3 представляет собой арматурный стержень обоими концами заделанный в бетон. Бетонные элементы образца имеют форму правильных четырехугольных призм. При изготовлении образцов длина заделки регулируется при помощи вкладышей (ПВХ трубка). Усилие, прикладываемое к образцу, создается за счет домкратов 2. Растягивающее усилие распределяет опорная плита 4, являющаяся элементом конструкции траверс 1. Для устранения неровностей бетонной поверхности

между образцом и опорной плитой и сглаживания локальных контактных напряжений устанавливаются резиновые прокладки 5. Проскальзывание свободных концов арматурного стержня, а так же проскальзывание арматурного стержня со стороны приложения нагрузки измеряют при помощи индикаторов перемещений часового типа 8 (снятие показаний индикаторов производят на каждом этапе нагружения образца).

Для изготовления опытных образцов использовали композитную арматуру трех типов. Основные физико-механические характеристики использованных арматурных стержней более подробно приведены в таблице 1.

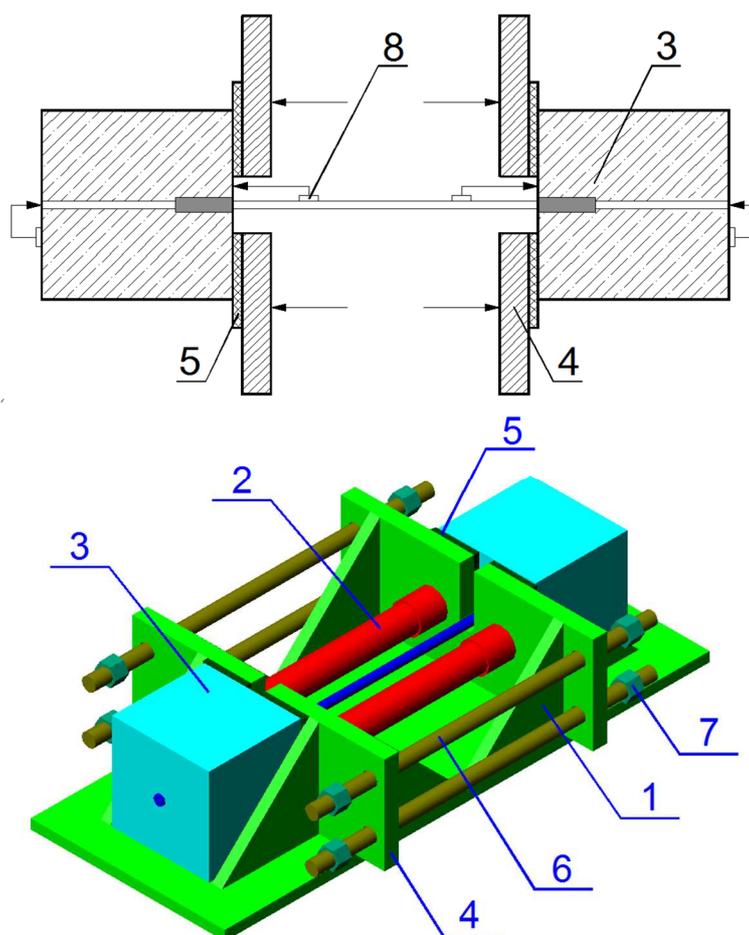


Рисунок 1. – Принципиальная схема разработанной методики испытаний и схема испытательной установки в аксонометрии [8]:

1 – траверса; 2 – домкрат; 3 – образец; 4 – опорная плита; 5 – резиновая прокладка; 6 – стальной стержень; 7 – гайка; 8 – индикаторы перемещений; → направление приложения растягивающего усилия

Из древесностружечных плит были изготовлены формы для образцов. Формы смазывали, а затем в них устанавливались арматурные стержни. Бетонную смесь приготавливали в бетоносмесителе гравитационного типа. Уплотнение бетонной смеси осуществляли при помощи глубинного вибратора. Дополнительно на основе каждого замеса изготавливалось по 3 контрольных образца-куба с размерами граней 100x100x100 мм, предназначенных для контроля прочности бетона. Набор прочности этих образцов проходил в тех же температурно-влажностных условиях, что и набор прочности опытных образцов основной испытательной программы. Всего, для изучения характеристик сцепления композитной арматуры с бетоном было изготовлено 15 образцов.

Таблица 1. – Основные физико-механические характеристики арматурных стержней

Условное обозначение	Материал арматурного стержня	Номинальный диаметр $d_n$ , мм	Диаметр силового стержня $d$ , мм	Тип обработки поверхности	Предел прочности $\sigma$ , МПа	Модуль упругости $E_r$ , МПа
#6 С	Стекло-пластик	6	5,2	Оплетка	1300	45500
#8 С		8	7,4	Оплетка	1300	45500
#10 С		10	8,6	Оплетка	1300	45500
#12 С		12	11,1		1300	45500
#6 Б	Базальто-пластик	6	5,8	Песчаная посыпка	1200	50000

**Результаты испытаний.** Напряжения сцепления арматуры с бетоном  $\tau$  (МПа) на каждом этапе приложения нагрузок вычисляли по формуле (1):

$$\tau = \frac{P}{\pi \cdot D_d \cdot l_d} \quad (1)$$

где  $P$  – усилие (Н) приложенное к образцу на этапе нагружения;

$D_d$  – диаметр силового стержня, мм;

$l_d$  – длина заделки стержня в бетон, мм.

По результатам испытания каждого образца строили диаграммы " $\tau - s$ ".

Показания индикаторов, расположенных на свободных концах арматурного стержня испытываемого образца, в дополнительной обработке не нуждались. Показания индикаторов, фиксирующих проскальзывание арматурного стержня со стороны приложения нагрузок, представляли собой сумму величины удлинения стержня в результате приложения нагрузки и величины проскальзывания соответствующих точек композитной арматуры:

$$s_{le} = s_t - s_c \quad (2)$$

где  $s_t$  – показания индикатора перемещений часового типа, мм;

$s_c$  – упругое удлинение арматурного стержня, мм.

Упругие удлинения арматурного стержня  $s_c$  вычисляли как

$$s_c = \frac{P \cdot L}{E_r \cdot A_r} \quad (3)$$

$L$  – расстояние от точки крепления индикатора часового типа до заделки, м;

$A_r$  – площадь поперечного сечения силового стержня, мм<sup>2</sup>;

$E_r$  – модуль упругости арматурного стержня, МПа.

Ниже приводятся диаграммы " $\tau - s$ " построенные на основе полученных экспериментальных данных (рис. 2). Так как создание жесткого режима нагружения ввиду технических особенностей силового оборудования представлялось невозможным, эти диаграммы описывают закон «напряжение сцепления-проскальзывание» для композитных арматурных стержней на начальной стадии нагружения образца (так называемой упругой стадии деформаций). *Сплошная линия* на диаграмме описывает закон проскальзывания арматуры полученный на основе регрессионного анализа (в качестве аппроксимирующей принята линейная функция); *пунктирная линия* – на основе теории сцепления композитной арма-

туры с бетоном изложенной в [9] (параметрические точки определены с использованием результатов проведенных экспериментов).

**Влияние прочности бетона на характеристики сцепления композитной арматуры с бетоном.** В подавляющем большинстве случаев при достижении предельного напряжения сцепления арматуры с бетоном наблюдалось разрушение анкерного слоя арматуры (рис. 3).

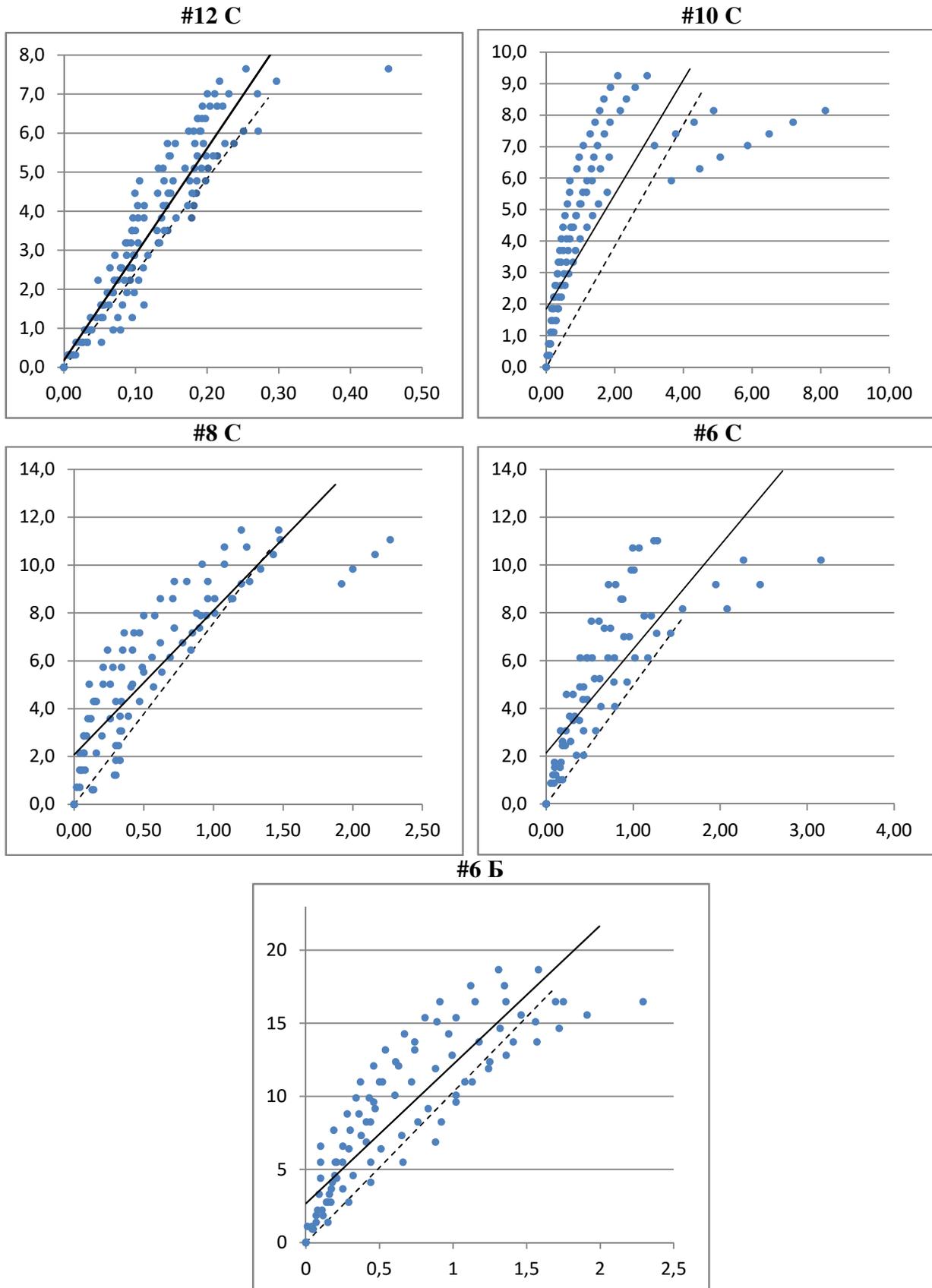


Рисунок 2. - Диаграммы "τ-s" для точек образца, расположенных со стороны приложения нагрузок



Рисунок 3. – Общий вид образца #12С после испытаний

Однако в образцах со стержнями номинальным диаметром 12 мм наблюдали раскалывание бетонного образца вдоль оси арматурного стержня. На рисунке 4 показан график зависимости прочности сцепления арматуры с бетоном в зависимости от прочности бетона образцов при сжатии.

Принимая во внимание характер разрушения испытанных образцов, а также полученные значения предельных напряжений сцепления в зависимости от прочности бетона можно заключить следующее: для образцов, имевших среднюю прочность бетона в диапазоне от 37,4 МПа до 63,2 МПа не удалось выявить однозначной зависимости максимального напряжения сцепления от прочностных свойств бетона.

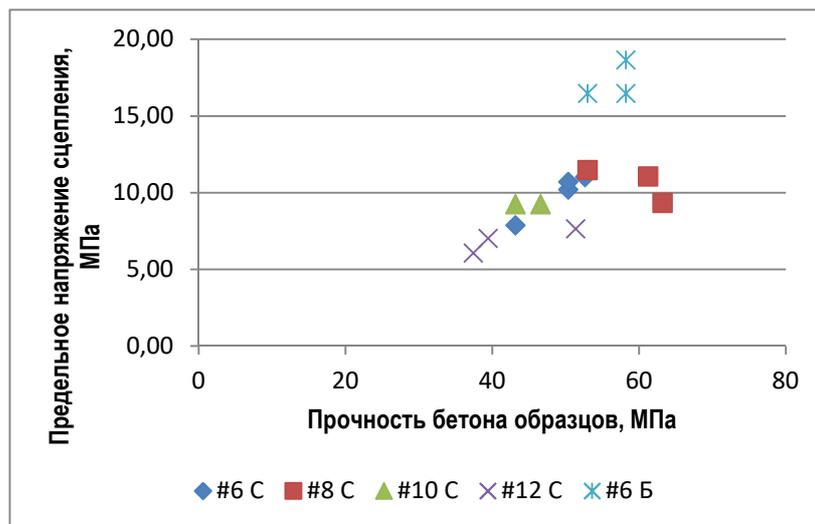


Рисунок 4. – Зависимость предельного напряжения сцепления от прочности бетона на сжатие

**Влияние диаметра арматурного стержня на характеристики сцепления стеклопластиковой арматуры с бетоном.** Анализируя полученные результаты (рис. 5) можно сделать вывод о том, что с увеличением диаметра арматурных стержней, имеющих одинаковую геометрию анкерного слоя, прочность сцепления арматуры с бетоном снижается. Для использованных в работе стеклопластиковых арматурных стержней можно говорить о близком к линейному характере такой зависимости.

**Влияние типа поверхности арматурного стержня на характеристики сцепления композитной арматуры с бетоном.** Из полученных результатов видно, что прочность сцепления базальтопластиковых арматурных стержней значительно выше прочности сцепления стеклопластиковых стержней. При этом физико-механические характеристики обоих типов стержней являются схожими. Таким образом, тип поверхности базальтопластиковых арматурных стержней (песчаная посыпка) обеспечивает более надежные условия сцепления. Средняя предельная прочность сцепления базальтопластиковых арматурных стержней

(номинального диаметром 6 мм) больше средней предельной прочности сцепления стеклопластиковых арматурных стержней (номинального диаметром 6 мм) на 73%.

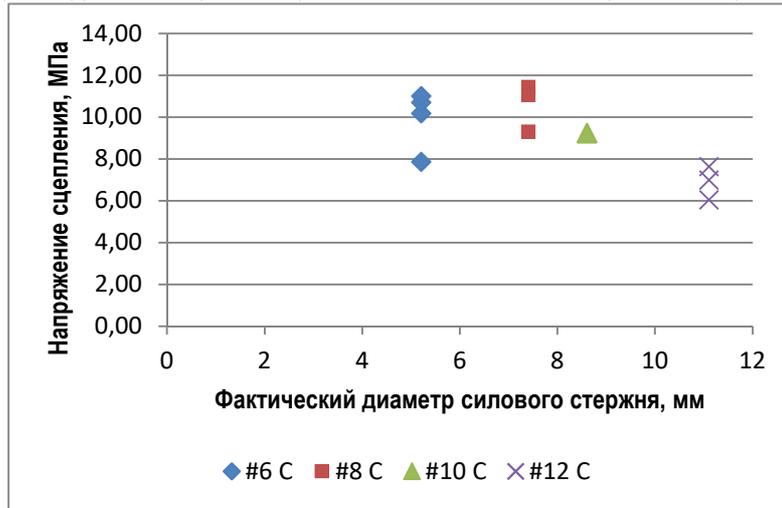


Рисунок 5. – Графическая интерпретация изменения значений предельного напряжения сцепления от фактического диаметра силового стержня

**Заключение.** Результаты, полученные с использованием разработанной методики испытаний, хорошо согласуются с результатами, описанными в других литературных источниках. Аналогичные результаты описывающие влияние прочности бетона на характеристики сцепления композитной арматуры с бетоном получены в исследованиях [10, 11]; близкие результаты относящиеся к оценке влияния диаметра арматурного стержня на характеристики сцепления композитной арматуры с бетоном получены в [12, 13]; аналогичные результаты касательно влияния геометрии анкерного слоя на характеристики сцепления композитной арматуры с бетоном получены в исследованиях [11]; значения предельного напряжения сцепления стеклопластиковой арматуры с бетоном сопоставимы со значениями, полученными в [10, 11, 12, 13]. Таким образом предложенная методика испытаний, как и сконструированная испытательная установка, являются хорошей альтернативой методике испытаний изложенной RILEM/CEB/FIB, устраняющей ряд недостатков свойственных ее реализации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Zhao, W. Crack and deformation behaviour of FRP reinforced concrete structures, PhD Thesis, University of Sheffield. 1999
2. Тур, В.В. Сопrotивление изгибаемых железобетонных элементов с комбинированным армированием стеклопластиковыми и стальными стержнями / В.В. Тур, В.В. Мальха // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будовлі та споруди : зб. наукових праць. – Рівне, 2012. – Вип. 24. – С. 271–281.
3. Manfredi, G. A refined R.C. beams elements including bond-slip relationships for the analysis of continuous beams / G. Manfredi, M. Pecce // Computer and Structures. – 1998. – Vol. 69, Is. 1. – P. 53–62.
4. Iyer, S.L. Advanced Composites Materials in Civil Engineering Structures / S.L. Iyer, R. Sen // American Society of Civil Engineers: Specialty Conference. – NY, 1990.
5. ModelCode 2010.
6. Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Общие технические условия : ГОСТ 31938-2012.
7. Бетоны конструкционные тяжелые. Технические условия : ГОСТ 1544-2005.

8. Пат. 11559 Респ. Беларусь : № и 20170104 / В.В. Тур, А.В. Замировский, Е.В. Шляхова ; заявл. 20.03.2017.
9. Baena M., Torres L., Turon A., Barris C. 2009. Experimental study of bond behavior between concrete and FRP bars using a pull-out test. *Composite Part: B* 40 (8) : 784–797.
10. Nanni, A., Al-Zahrani, M.M., Al-Dulaijan, S.U., Bakis, C.E., Boothby, T.E..Bond of FRP reinforcement to concrete - experimental results. In: Taerwe, L., editor. *Second International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*. 1995, p. 135–145.
11. Lee, J.Y., Kim, T.Y., Kim, T.J., Yi, C.K., Park, J.S., You, Y.C., et al. Interfacial bond strength of glass fiber reinforced polymer bars in high-strength concrete. *Composites Part B-Engineering* 2008; 39(2): 258–270. [25] CSA S806-02. *Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers*. CSA Standard, CanadianStandardsAssociation. Canada. 187 p. 2002.
12. Freimanis, A.J., Bakis, C.E., Nanni, A., Gremel, D.A..A comparison of pull-out and tensile behaviours of FRP reinforcement for concrete. In: H, S., editors, E.M., editors. *Second International Conference on Composites in Infrastructure*. 1998.
13. Tastani, S.P., Pantazopoulou, S.J. Bond of GFRP bars in concrete: Experimental study and analytical interpretation. *Journal of Composites for Construction* 2006 ; 10(5) : 381–391.