

ВЛИЯНИЕ ВИДА ПОДГОТОВКИ ПОВЕРХНОСТИ СТЕКЛОВОЛОКОННОЙ АРМАТУРЫ НА ЕЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И СЦЕПЛЕНИЕ С БЕТОНОМ

В. Е. РУМЯНЦЕВА¹, В. С. КОНОВАЛОВА²

¹ д.т.н., профессор, чл.-корр. РААСН, заведующий кафедрой естественных наук и техносферной безопасности, Ивановский государственный политехнический университет, профессор кафедры естественнонаучных дисциплин, Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий,

² к.т.н., доцент кафедры естественных наук и техносферной безопасности, Ивановский государственный политехнический университет
г. Иваново, Российская Федерация

Аннотация. Рассмотрено влияние вида обработки поверхности стекловолоконной арматуры на технические характеристики. За счет создания навивки на поверхности стержня композитной арматуры повышаются прочностные показатели. Обработка поверхности композитной арматурой плазмой и нанесение покрытий ухудшают прочностные характеристики. Исследована прочность сцепления стекловолоконной арматуры с бетоном. Повышению сцепления способствует создание на поверхности прутка из стекловолокна навивки сложного профиля, поскольку увеличение числа выступов на поверхности интенсивнее препятствует сдвигу арматуры в бетоне. Разработанный вид навивки периодического профиля в 2 раза повышает прочность сцепления композитной арматуры с бетоном. Покрытия на поверхности стекловолоконной арматуры имеют меньшую адгезию к бетону по сравнению с необработанными стержнями, разница составляет до 8,5 %. При воздействии на армированный композитной арматурой с покрытиями бетон агрессивной хлоридсодержащей среды происходит большая потеря прочности сцепления в композите вследствие коррозионного взаимодействия материала покрытий с поступающими через бетонное покрытие к поверхности арматуры хлорид-ионами. Разработанный вид навивки периодического профиля обеспечивает поддержание сцепления стекловолоконной арматуры с бетоном при воздействии жидкой агрессивной хлоридсодержащей среды.

Ключевые слова: композитная арматура, стекловолоконная арматура, армированный бетон, сцепление композитной арматуры с бетоном, прочность сцепления, обработка поверхности композитной арматуры, виды навивки, характеристики стекловолоконной арматуры, коррозия бетона, прочность бетона.

INFLUENCE OF THE TYPE OF SURFACE PREPARATION OF FIBERGLASS REINFORCEMENT ON ITS TECHNICAL CHARACTERISTICS AND ADHESION TO CONCRETE

V. E. RUMYANTSEVA¹, V. S. KONOVALOVA²

¹ Doctor of technical sciences, professor, corresponding member of the RAACS, head of the department of natural sciences and technosphere safety, Ivanovo State Polytechnic University, professor of the department of natural sciences, Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters,

² PhD in engineering, associate professor of the department of natural sciences and technosphere safety, Ivanovo State Polytechnic University
Ivanovo, Russian Federation

Abstract. The influence of the type of surface treatment of fiberglass reinforcement on the technical characteristics is considered. Strength indicators increase due to the formation of the winding on

the surface of the composite reinforcement. Surface treatment of composite reinforcement with plasma and coating degrade strength characteristics. The bonding strength of fiberglass reinforcement with concrete is investigated. An increase in adhesion is facilitated by the creation of a complex profile winding on the surface of a fiberglass rod, since an increase in the number of protrusions on the surface more intensively prevents the rebar from shifting in concrete. The developed type of winding of the periodic profile increases the adhesion strength of composite reinforcement with concrete by 2 times. Coatings on the surface of fiberglass reinforcement have less adhesion to concrete compared to untreated rods, the difference is up to 8.5 %. When exposed to concrete reinforced with composite reinforcement with coatings of an aggressive chloride-containing medium, a large loss of adhesion strength occurs in the composite due to the corrosive interaction of the coating material with chloride ions coming through the concrete coating to the surface of the reinforcement. The developed type of winding of the periodic profile ensures the maintenance of adhesion of fiberglass reinforcement with concrete when exposed to a liquid aggressive chloride-containing medium.

Keywords: composite reinforcement, fiberglass reinforcement, reinforced concrete, adhesion of composite reinforcement to concrete, adhesion strength, surface treatment of composite reinforcement, types of winding, characteristics of fiberglass reinforcement, concrete corrosion, concrete strength.

Введение.

В последние два десятилетия использование полимерных стержней представляет большой интерес для армирования бетонных изделий, в частности для усиления бетонных балочных конструкций, из-за их высокой удельной прочности, высокой коррозионной стойкости и низкой стоимости изготовления. Армированный стекловолоконной арматурой бетон состоит из высокопрочных, стойких к щелочам стекловолоконных стержней, встроенных в бетонную матрицу. В этой форме как волокна, так и матрица сохраняют свою физическую и химическую идентичность, предлагая при этом синергетическую комбинацию свойств, которые не могут быть достигнуты при действии любого из компонентов по отдельности.

Встроенная в бетон арматура, независимо от материала, сопротивляется вытягиванию с помощью трех основных механизмов. Первый – это химическая адгезия между двумя материалами на их границе раздела. Вторым является фрикционное соединение, которое возникает из-за шероховатости поверхности арматурного прутка. Третьим механизмом, способствующим сцеплению, является механическая опора, например, создаваемая выступами арматурных стержней на окружающий бетон.

Для сцепления с бетоном в процессе производства на поверхности композитной арматуры формируются специальные кромки или наносится песчаное покрытие. Одной из основных проблем является слабая прочность сцепления между стержнями композитной арматуры и бетонным материалом [1–5]. Поскольку эта основная проблема вызывает низкую способность к изгибу, высокий прогиб и большую ширину трещин в железобетонных балках [6–8]. Вследствие этого, использование стеклопластиковых стержней на практике не получило достаточного распространения, а также инженерные применения этих полезных материалов все еще ограничены.

Адгезионное соединение играет решающую роль, поскольку обеспечивает эффективную передачу напряжения от бетона к стеклопластику для обеспечения целостности и долговечности усиленных конструкций. В частности, что касается усиления при сдвиге, то почти все стекловолоконные стержни, усиленные приклеенной навивкой, выходят из строя из-за расслаивания или отслаивания стеклопластика [9–11].

Известно [3; 12–15], что ребристые прутки из стекловолокна по-разному развивают прочность сцепления в зависимости от механических свойств бетона. Бетоны со средней прочностью на сжатие в диапазоне 25–40 МПа не оказывают сильного влияния на прочность сцепления, в то время как в диапазоне 40–65 МПа прочность сцепления значительно возрастает [2; 16–18]. Высокая прочность бетона задерживает появление трещин в нижних слоях, но обеспечивает более плавное и быстрое продвижение трещин [19–23].

В этом исследовании цель состоит в том, чтобы представить применимое решение, касающееся нарушений сцепления стеклопластиковых стержней с бетоном и состоящее в модификации обработки поверхности композитной арматуры.

Основные результаты исследований.

Испытания проводились на образцах стекловолоконной арматуры диаметром 10 мм с различными видами обработки поверхности (табл. 1). Из технических характеристик видно, что нанесение покрытий на поверхность композитной арматуры снижает прочностные свойства на 2–6 %, а модуль упругости незначительно повышается на 0,5–1 %. Спиралевидная навивка на арматурном стержне (рис. 1, *а*), приклеенная к поверхности эпоксидной смолой, повышает прочностные характеристики примерно на 6 % и модуль упругости на 1,5–2 %. При формировании на поверхности стекловолоконного прутка разработанной навивки периодического профиля (рис. 1, *б*) [24; 25] происходит повышение прочностных показателей на 20–30 %, а модуля упругости на 3 %.

Таблица 1 – Технические характеристики стеклокомпозитной арматуры с различными видами обработки поверхности

Вид обработки поверхности	Предел прочности на изгиб, МПа	Предел прочности на растяжение, МПа	Модуль упругости, МПа
Без покрытия	1380	1170	54700
Напыление из нержавеющей стали	1350	1150	55300
Напыление из оксида титана	1340	1130	55100
Обработка плазмой	1300	1100	55000
Спиралевидная навивка	1452	1237	55700
Навивка периодического профиля	1840	1430	56300

Источник: данные авторов

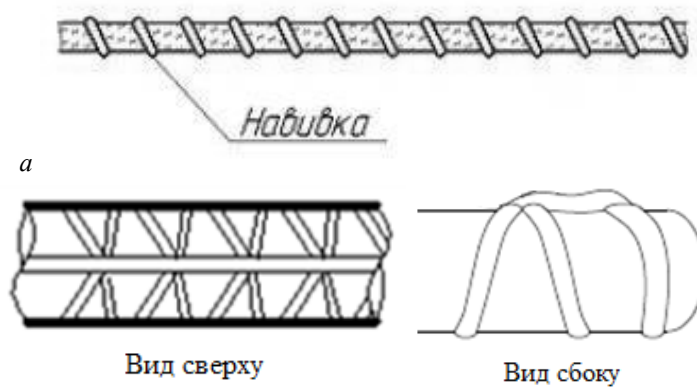
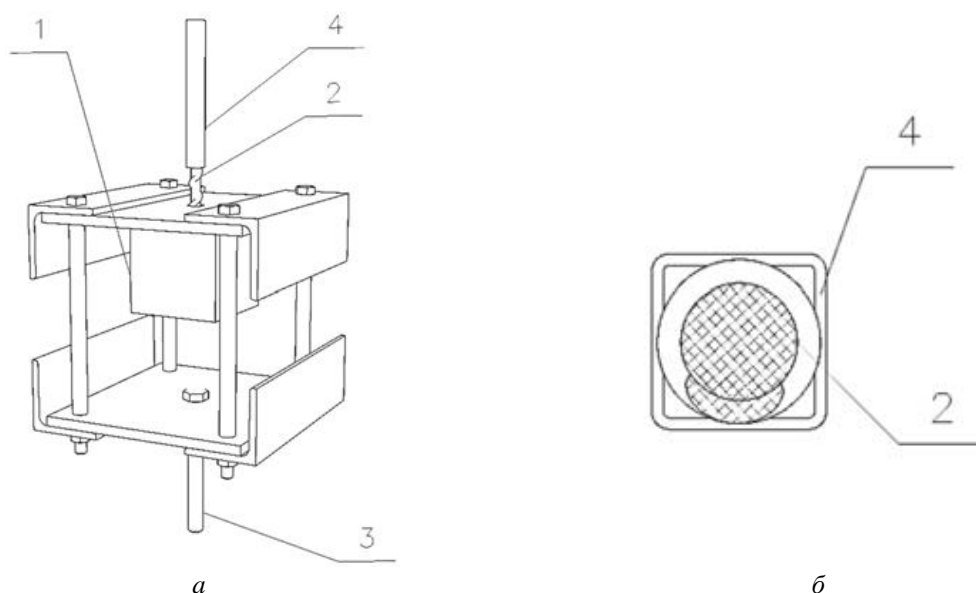


Рисунок 1 – Виды испытуемой навивки стеклокомпозитной арматуры:
а – спиралевидная; *б* – периодического профиля

Источник: данные авторов

Для изучения сцепления композитной арматуры с бетоном изготовлены образцы из портландцемента марки ЦЕМ I 42,5 Н и гравийного щебня размером фракции 5–20 мм в качестве наполнителя. После твердения на воздухе в течение 28 суток проводились испытания по вырыванию прутка стекловолоконной арматуры из бетона на разрывной машине с помощью разработанного для этой цели приспособления (рис. 2) [26].

Дополнительные исследования прочности сцепления композитной арматуры с бетоном проведены после воздействия на образцы воды и 2 %-ого раствора $MgCl_2$ в течение 6 месяцев. Из полученных результатов (табл. 2) видно, что покрытия из нержавеющей стали и оксида титана, а также обработка плазмой не способствуют повышению адгезии композитной арматуры к бетону. У образцов стекловолоконной арматуры со спиралевидной навивкой прочность сцепления выше на 30 %, по сравнению с образцом без навивки и покрытия. У образца с навивкой периодического профиля сцепление с бетоном почти в 2 раза больше, чем у необработанного арматурного стержня, и на 50 % выше, чем у образца со спиралевидной навивкой.



Риснок 2 – Приспособление для испытаний на вырывание арматурного стержня из бетона:
а – общий вид приспособления; *б* – поперечное сечение гильзы; 1 – удерживающее устройство;
 2 – стержень арматуры; 3 – отверстие для болта; 4 – гильза

Таблица 2 – Усилия вырывания (кН) стеклокомпозитной арматуры из бетона с разными видами обработки поверхности и типами навивки

Вид поверхности	До воздействия среды	После выдерживания в воде	После выдерживания в 2 %-ом растворе MgCl ₂
Без покрытия	41,0	39,1	38,3
Напыление из нержавеющей стали	37,9	36,5	34,0
Напыление из оксида титана	36,4	35,7	33,2
Обработка плазмой	40,4	38,7	36,6
Спиралевидная навивка	53,3	53,1	51,0
Навивка периодического профиля	79,1	78,9	76,3

Источник: данные авторов

После воздействия на бетон воды и агрессивной хлоридсодержащей среды прочность сцепления композитной арматуры с бетоном снижается вследствие вымывания из структуры цементного камня гидроксида кальция, разрушения кальцийсодержащих фаз и снижения прочности цементного камня [27; 28]. Для наглядного сравнения результаты приведены на рис. 3.

После пребывания образцов в воде в течение 6 месяцев прочность сцепления стекловолоконной арматуры без обработки поверхности с бетоном уменьшилась на 4,5 %, арматуры с напылением из нержавеющей стали – на 3,5 %, арматуры с напылением из оксида титана – на 2 %, обработанной плазмой арматуры – на 4 %, арматуры со спиралевидной навивкой – на 0,4 %, арматуры с периодической навивкой – на 0,25 %.

После воздействия на образцы 2 %-ого раствора MgCl₂ в течение 6 месяцев прочность сцепления стекловолоконной арматуры без обработки поверхности с бетоном уменьшилась на 6,5 %, арматуры с напылением из нержавеющей стали – на 10 %, арматуры с напылением из оксида титана – на 8,5 %, обработанной плазмой арматуры – на 9,5 %, арматуры со спиралевидной навивкой – на 4 %, арматуры с периодической навивкой – на 3,5 %.

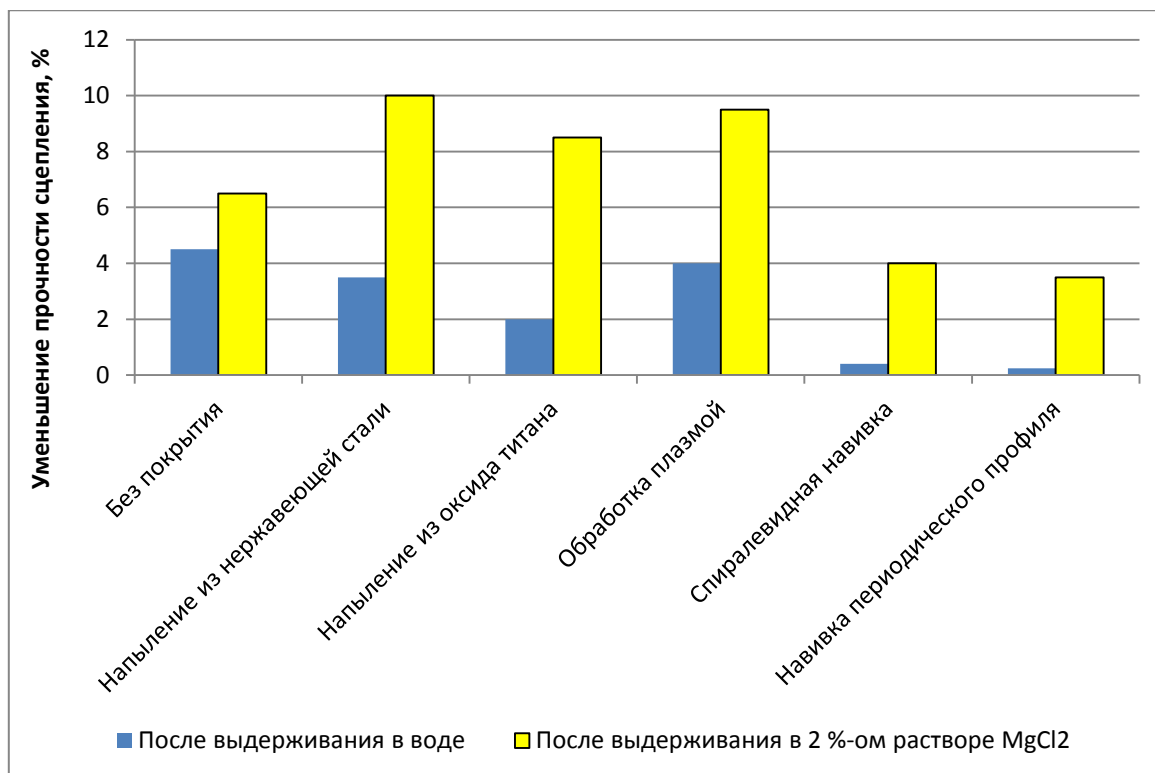


Рисунок 3 – Уменьшение прочности сцепления стекловолоконной арматуры с разными видами обработки поверхности с бетоном после воздействия воды и агрессивной хлоридсодержащей среды в течение 6 месяцев

Большее снижение сцепления композитной арматуры с напыленными покрытиями и обработанных плазмой стержней при воздействии на бетон 2 %-ого раствора MgCl₂ может быть связано с воздействием на покрытия хлорид-ионов, проникающих к поверхности арматуры. Было установлено [29], что для накопления у поверхности арматуры в бетоне предельной концентрации хлорид-ионов (0,4 % по массе бетона) требуется в среднем 174 дня. Следовательно, за 6 месяцев испытаний уже начались коррозионные процессы на поверхности обработанной плазмой стекловолоконной арматуры и образцов с напыленными покрытиями из нержавеющей стали и оксида титана. Вследствие этого нарушилась адгезия покрытий с бетоном.

Очевидно, что посредством увеличения количества выступов на поверхности композитной арматуры можно значительно повысить ее сцепление с бетоном. Навивка периодического профиля имеет большую площадь поверхности приклеивания к арматурному стержню, что предотвращает проскальзывание прутка при вырывании, однако остается вероятность частичного скалывания и отрыва витков навивки.

Выводы.

При создании на поверхности стержня навивки улучшаются технические характеристики композитной арматуры. Напыления из нержавеющей стали и оксида титана и обработка плазмой снижают прочностные показатели стекловолоконной арматуры.

Повышение прочности сцепления композитной арматуры с бетоном может быть обеспечено созданием на поверхности арматурного стержня навивки сложного профиля. Обработка поверхности стекловолоконной арматуры плазмой и нанесение покрытий не целесообразны, поскольку в целом снижают адгезию арматурных стержней и бетона, а при эксплуатации изделий в агрессивных средах значительно уменьшают сцепление в композите.

Разработанная навивка периодического профиля способствует улучшению эксплуатационных характеристик стекловолоконной арматуры и может быть рекомендована для применения к арматуре в бетонных изделиях, эксплуатирующихся в жидких хлоридсодержащих средах.

Литература:

1. Исследование влияния утолщений в стеклопластиковой арматуре на сцепление с бетоном / Т. А. Зиннуров [и др.] // Известия КГАСУ. – 2021. – № 2 (56). – С. 84–93.

2. Экспериментальные исследования прочности сцепления стеклопластиковой арматуры с цементно-песчаным бетоном / А. Н. Николюкин [и др.] // *Транспортные сооружения*. – 2019. – Т. 6. – № 1. – 02SATS119.
3. Макарова, Н. В. Прочностные и деформационные свойства контакта композитной арматуры с мелкозернистым бетоном / Н. В. Макарова, А. И. Комаров, В. Г. Цуприк // *Вестник инженерной школы ДВФУ*. – 2020. – № 3 (44). – С. 139–150.
4. Adhesion, strengthening and durability issues in the retrofitting of Reinforced Concrete (RC) beams using Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) – A Review / P. J. Poot Cauich, et al. // *Revista ALCONPAT*. – 2019. – Vol. 9. – No. 2. – P. 130–150.
5. A Study on the Adhesion in the Interfacial Transition Zone Between Glass Fibre Reinforced Rebar and the Cement Matrix / G. Yakovlev, et al. // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2021. – Vol. 1203. – P. 032023.
6. Шарифов, А. Х. Экспериментальные исследования прочности, жесткости и трещиностойкости облегченных плит с комбинированным армированием / А. Х. Шарифов, Ю. А. Ивашенко, А. Дж. Рахмонзода // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура»*. – 2021. – Т. 21. – № 4. – С. 5–15.
7. О результатах экспериментального и численного исследований напряженно-деформированного состояния бетонных конструкций, армированных предварительно напряженными полимеркомпозитными стержнями / А. А. Пискунов [и др.] // *Интернет-журнал «Транспортные сооружения»*. – 2018. – № 2. – 02SATS218.
8. Kosior-Kazberuk, M. Analysis of deflection and cracking of concrete beams with non-metallic reinforcement / M. Kosior-Kazberuk, J. Krassowska // *CzOTO*. – 2019. – Vol. 1. – Issue 1. – P. 782–789.
9. Diab, H. M. An Anchorage Technique for Shear Strengthening of RC T-Beams Using NSM-BFRP Bars and BFRP Sheet / H. M. Diab, A. M. Sayed // *International Journal of Concrete Structures and Materials*. – 2020. – Vol. 14. – Article No. 49.
10. Сцепление полимеркомпозитной арматуры с цементным бетоном / В. Г. Хозин [и др.] // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. – 2013. – № 1 (23). – С. 214–220.
11. Полоз, М. А. Анализ применения полимеркомпозитной арматуры в армобетонных конструкциях / М. А. Полоз, Н. В. Фролов, М. Ш. Ноурузи // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова*. – 2017. – № 3. – С. 45–50.
12. Численное моделирование сцепления композитной арматуры с бетоном / Т. А. Зиннуров [и др.] // *Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ»*. – 2015. – Т. 7. – № 4. – 11TVN415.
13. Хорохордин, А. М. Сравнительная оценка механических свойств полимерной композитной арматуры / А. М. Хорохордин, А. М. Усачев, Д. Н. Коротких // *Строительные материалы*. – 2018. – № 7. – С. 71–75.
14. Influence of rib parameters on mechanical properties and bond behavior in concrete of fiber-reinforced polymer rebar / P. Zhang, et al. // *Advances in Structural Engineering*. – 2021. – Vol. 24. – Issue 1. – P. 196–208.
15. Experimental Study on the Bond Performance between Fiber-Reinforced Polymer Bar and Unsaturated Polyester Resin Concrete / W. Li, et al. // *Advances in Civil Engineering*. – 2021. – Vol. 2021. – Article ID 6676494.
16. Алимов, М. Ф. Исследование совместной работы цементных бетонов и композитной арматуры в изгибаемых элементах, работающих в условии действия агрессивных сред : автореферат дис.... кандидата технических наук : 2.1.1. / М. Ф. Алимов ; ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства». – Пенза, 2022. – 27 с.
17. Concrete cover effect on the bond of GFRP bar and concrete under static loading / A. Veljkovic, et al. // *Composites Part B: Engineering*. – 2017. – Vol. 124. – P. 40–53.
18. A Review on the Physical Parameters Affecting the Bond Behavior of FRP Bars Embedded in Concrete / B. Başaran, et al. // *Polymers*. – 2022. – Vol. 14. – Issue 9. – P. 1796.
19. Прочность, трещиностойкость и долговечность конструкционного бетона при температурных и коррозионных воздействиях: монография: в 2 ч. Ч. 1 / С. Н. Леонович [и др.], под ред. С. Н. Леоновича. – Минск: БНТУ, 2016. – 393 с.
20. Прочность, трещиностойкость и долговечность конструкционного бетона при температурных и коррозионных воздействиях: монография: в 2 ч. Ч. 2 / С. Н. Леонович [и др.], под ред. С. Н. Леоновича. – Минск: БНТУ, 2016. – 204 с.

21. Loading rate effect on the fracture behaviour of highstrength concrete / G. Ruiz, et al. // EPJ Web of Conferences. – 2010. – Vol. 6. – P. 23007.
22. Иваненко, А. Н. Раскрытие трещин в железобетонных элементах с учетом сопротивления бетона их развитию : диссертация... кандидата технических наук : 05.23.01 / А. Н. Иваненко. – Сочи, 2015. – 156 с.
23. Deformation Characteristics of Ultrahigh-Strength Concrete under Unrestrained and Restrained States / J.-H. Lee, et al. // Advances in Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 2017. – Article ID 3679323.
24. Joint Work of Cement Concrete and Composite Reinforcement with Periodic Profile Winding / S. V. Fedosov, et al. // Materials Science Forum. – 2019. – Vol. 974. – P. 119–124.
25. Караваев, И. В. Навивка для композитной арматуры периодического профиля / И. В. Караваев, И. В. Воробьев, В. С. Коновалова // Молодые ученые – развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК). – 2018. – № 1 (1). – С. 303–305.
26. Приспособление для проведения испытаний по вырыванию из бетона прутка композитной арматуры : полез.модель RU 149570 / И. В. Караваев, Ю. А. Щепочкина, В. Е. Румянцева, В. С. Коновалова. – Опубл. 10.01.2015.
27. Romyantseva, V. E. Changes in the structural and phase composition and strength characteristics of concrete during liquid corrosion in chloride-containing media / V. E. Romyantseva, V. S. Konvalova, B. E. Narmaniya // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1926. – P. 012057.
28. Федосов, С. В. Исследование процессов коррозионной деструкции железобетонных изделий в агрессивных средах с хлорид-ионами / С. В. Федосов, В. Е. Румянцева, В. С. Коновалова // Вестник гражданских инженеров. – 2016. – № 5 (58). – С. 61–67.
29. Скорость проникновения хлорид-ионов к поверхности стальной арматуры в гидрофобизированных бетонах / С. В. Федосов [и др.] // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. – 2018. – № 4 (56). – С. 93–98.

References:

1. Zinnurov T. A., Majstrenko I. Yu., Erokhin D. I., Zamilova A. Kh., Umarov B. Sh. *Issledovaniye vliyaniya utolshcheniy v stekloplastikovoy armature na stsepleniye s betonom* [Investigation of the effect of thickenings in fiberglass reinforcement (FRP) on adhesion to concrete]. *Izvestiya KGASU*. 2021. No. 2 (56). Pp. 84–93. (rus)
2. Nikol'yukin A. N., Yartsev V. P., Kolomnikova I. I., Aljabouri D. Z. *Ekspperimentalnyye issledovaniya prochnosti stsepleniya stekloplastikovoy armatury s tsementno-peschanym betonom* [Experimental studies of the strength of adhesion of fiberglass reinforcement with cement-sand concrete]. *Russian journal of transport engineering*. 2019. Vol. 1. No. 6. P. 02SATS119. (rus)
3. Makarova N. V., Komarov A. I., Tsuprik V. G. *Prochnostnyye i deformatsionnyye svoystva kontakta kompozitnoy armatury s melkozernistym betonom* [Strength and deformation properties of the contact of composite reinforcement with fine-grained concrete]. *FEFU: SCHOOL of ENGINEERING BULLETIN*. 2020. – No. 3/44. – Pp. 139–150. (rus)
4. Poot Cauich P. J., Martínez-Molina R., Gamboa Marrufo J. L., Herrera Franco P. J. Adhesion, strengthening and durability issues in the retrofitting of Reinforced Concrete (RC) beams using Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP). – A Review. *Revista ALCONPAT*. 2019. – Vol. 9. No. 2. – Pp. 130–50.
5. Yakovlev G., Saidova Z., Drochytka R., Gordina A., Pudov I., Kuzmina N., Begunova E., Mohamed Elrefai A. E. M. A Study on the Adhesion in the Interfacial Transition Zone Between Glass Fibre Reinforced Rebar and the Cement Matrix. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1203. Article No. 032023.
6. Sharifov A. Kh., Ivashenko Yu. A., Rakhmonzoda A. Dzh. *Ekspperimentalnyye issledovaniya prochnosti, zhestkosti i treshchinostoykosti oblegchennykh plit s kombinirovannym armirovaniyem* [Experimental Studies of Strength, Rigidity and Cracking Resistance of Lightweight Slabs with Combined Reinforcement]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2021. – Vol. 21. No. 4. – Pp. 5–15. (rus).
7. Piskunov A. A., Zinnurov T. A., Berezhnoi D. V., Umarov B. Sh., Volter A. R. *O rezultatakh eksperimentalnogo i chislennogo issledovaniy napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya betonnykh konstruksiy, armirovannykh predvaritelno napryazhennymi polimerkompozitnymi sterzhnyami*

[Experimental and numerical studies of stress-strain state of concrete structures reinforced with polymer-composite reinforcement]. *Russian journal of transport engineering*. 2018. – No. 2. P. 02SATS218. (rus)

8. Kosior-Kazberuk M., Krassowska J. Analysis of deflection and cracking of concrete beams with non-metallic reinforcement. *CzOTO*. 2019. – Vol. 1. Issue 1. – Pp. 782–789.

9. Diab H. M., Sayed A. M. An Anchorage Technique for Shear Strengthening of RC T-Beams Using NSM-BFRP Bars and BFRP Sheet. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2020. – Vol. 14. Article No. 49.

10. Khozin V. G., Piskunov A. A., Gizdatullin A. R., Kuklin A. N. *Stsepleniye polimerkompozitnoy armatury s tsementnym betonom* [Adhesion fiber-reinforced polymer bars with cement concrete]. *Izvestiya KGASU*. 2013. – No. 1 (23). – Pp. 214–220. (rus)

11. Poloz M., Frolov N., Nouruzi M. *Analiz primeneniya polimerkompozitnoy armatury v armobetonnnykh konstruktivnykh* [Analysis of the application of composite polymer reinforcement in reinforced concrete designs]. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after. V. G. Shukhov*. 2017. – No. 3. – Pp. 45–50. (rus)

12. Zinnurov T. A., Piskunov A. A., Safiyulina L. G., Petropavlovskikh O. K., Yakovlev D. G. *CHislennoye modelirovaniye stsepleniya kompozitnoy armatury s betonom* [Numerical modeling of bond composite reinforcement and concrete]. *Internet-journal «NAUKOVEDENIYE»*. 2015. Vol. 7. No. 4. 11TVN415. (rus)

13. Khorokhordin A. M., Usachev A. M., Korotkih D. N. *Sravnitel'naya otsenka mekhanicheskikh svoystv polimernoy kompozitnoy armatury* [Comparative assessment of mechanical properties of polymer composite reinforcement]. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2018. – No. 7. – Pp. 71–75. (rus)

14. Zhang P., Zhang S., Gao D., Dong F., Liu Y., Zhao J., Sheikh S. A. Influence of rib parameters on mechanical properties and bond behavior in concrete of fiber-reinforced polymer rebar. *Advances in Structural Engineering*. 2021. – Vol. 24. Issue 1. – Pp. 196–208.

15. Li W., Zhou M., Liu F., Jiao Y., Wu Q. Experimental Study on the Bond Performance between Fiber-Reinforced Polymer Bar and Unsaturated Polyester Resin Concrete. *Advances in Civil Engineering*. 2021. Vol. 2021. Article ID 6676494.

16. Alimov, M. F. *Issledovaniye sovmestnoy raboty tsementnykh betonov i kompozitnoy armatury v izgibayemykh elementakh, rabotayushchikh v uslovii deystviya agressivnykh sred* [Investigation of the joint work of cement concretes and composite reinforcement in bendable elements operating under the action of aggressive media] : avtoreferat dis... kandidata tekhnicheskikh nauk : 2.1.1. / M. F. Alimov ; Penzenskiy gosudarstvennyy universitet arkhitektury i stroitelstva. – Penza, 2022. – 27 p. (rus)

17. Veljkovic A., Carvelli V., Haffke M. M., Pahn M. Concrete cover effect on the bond of GFRP bar and concrete under static loading. *Composites Part B: Engineering*. 2017. – Vol. 124. – Pp. 40–53.

18. Başaran B., Kalkan İ., Beycioğlu A., Kasprzyk I. A Review on the Physical Parameters Affecting the Bond Behavior of FRP Bars Embedded in Concrete. *Polymers*. 2022. Vol. 14. Issue 9. P. 1796.

19. *Prochnost, treshchinostoykost i dolgovechnost konstruksionnogo betona pri temperaturnykh i korrozionnykh vozdeystviyakh* [Strength, crack resistance and durability of structural concrete under temperature and corrosion influences] : monografiya : v 2 ch. CH. 1 / S. N. Leonovich, et al., pod red. S. N. Leonovicha. – Minsk : BNTU, 2016. – 393 p. (rus)

20. *Prochnost, treshchinostoykost i dolgovechnost konstruksionnogo betona pri temperaturnykh i korrozionnykh vozdeystviyakh* [Strength, crack resistance and durability of structural concrete under temperature and corrosion influences] : monografiya : v 2 ch. CH. 2 / S. N. Leonovich, et al., pod red. S. N. Leonovicha. – Minsk : BNTU, 2016. – 204 p. (rus)

21. Ruiz G., Zhang X. X., Yu R. C., Porrás R., Poveda E., del Viso J. Loading rate effect on the fracture behaviour of highstrength concrete. *EPJ Web of Conferences*. 2010. Vol. 6. P. 23007.

22. Ivanenko, A. N. *Raskrytiye treshchin v zhelezobetonnnykh elementakh s uchetom soprotivleniya betona ikh razvitiyu* [Opening cracks in reinforced concrete elements, taking into account the resistance of concrete to their development] : dissertatsiya... kandidata tekhnicheskikh nauk: 05.23.01 / A. N. Ivanenko ; Rost. gos. stroit. un-t. – Sochi, 2015. – 156 p. (rus)

23. Lee J.-H., Lim K.-M., Yoo D.-Y., Lim N.-H. Deformation Characteristics of Ultrahigh-Strength Concrete under Unrestrained and Restrained States. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2017. Vol. 2017. Article ID 3679323.

24. Fedosov S. V., Romyantseva V. E., Konovalova V. S., Narmaniya B. E. Joint Work of Cement Concrete and Composite Reinforcement with Periodic Profile Winding. *Materials Science Forum*. 2019. – Vol. 974. – Pp. 119–124.
25. Karavayev I. V., Vorobyev I. V., Konovalova V. S. *Navivka dlya kompozitnoy armatury periodicheskogo profilya* [Winding for composite reinforcement of periodic profile]. *Molodyye uchenyye – razvitiyu Natsionalnoy tekhnologicheskoy initsiativy (POISK)*. 2018. – No. 1 (1). – Pp. 303–305. (rus)
26. *Prisposobleniye dlya provedeniya ispytaniy po vryvaniyu iz betona prutka kompozitnoy armatury* [A device for carrying out tests for pulling out a rod of composite reinforcement from concrete]: polez.model RU 149570 / I. V. Karavayev, YU. A. SHCHepochkina, V. YE. Romyantseva, V. S. Konovalova. – Opubl. 10.01.2015.
27. Romyantseva V. E., Konovalova V. S., Narmaniya B. E. Changes in the structural and phase composition and strength characteristics of concrete during liquid corrosion in chloride-containing media. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1926. P. 012057.
28. Fedosov S. V., Romyantseva V. E., Konovalova V. S. *Issledovaniye protsessov korrozionnoy destruktzii zhelezobetonnykh izdeliy v agressivnykh sredakh s khlorid-ionami* [Study of corrosion destruction processes of reinforced concrete products in aggressive environments containing chloride ions]. *Bulletin of civil engineers*. 2016. – No. 5 (58). – Pp. 61–67.
29. Fedosov S. V., Romyantseva V. E., Konovalova V. S., Karavaev I. V. *Skorost proniknoveniya khlorid-ionov k poverkhnosti stalnoy armatury v gidrofobizirovannykh betonakh* [Rate of penetration of chloride ions to the surface of steel reinforcement in hydrophobized concretes]. *Modern High Technologies. Regional Application*. 2018. – No. 4 (56). – Pp. 93–98.