

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА, ПРОИЗВОДСТВО СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

УДК 691.175.5/8

А. Х. БАЙБУРИН, д-р техн. наук, доц., проф. кафедры строительного производства и теории сооружений; З. Ю. КЛОЧКОВА, магистр кафедры строительного производства и теории сооружений; А. А. БОНДАРЬ, ст. преп. кафедры строительного производства и теории сооружений

ПРОЧНОСТЬ СЦЕПЛЕНИЯ КОМПОЗИТНОЙ ПОЛИМЕРНОЙ АРМАТУРЫ С БЕТОНОМ

ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)» (ЮУрГУ НИУ).

Россия, 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, д. 76.

Тел.: (351) 267-91-83; эл. почта: abayburin@mail.ru

Ключевые слова: армированный волокнами полимер, стеклопластик, профиль арматуры, адгезия к бетону, прочность сцепления, испытание на выдергивание.

В статье приведены результаты сравнительных испытаний прочности сцепления стеклопластиковой арматуры с бетоном с использованием адгезионных образцов. Метод определения сцепления, испытательное оборудование и применяемые приспособления соответствовали стандартным. Было испытано четыре серии образцов с различными адгезионными образками и без образки. По результатам испытаний произведена оценка практической применимости адгезионных составов для повышения сцепления стеклопластиковой арматуры с бетоном.

Введение

Композитная арматура, обладающая рядом уникальных свойств, находит все большее применение в строительстве. Композитная арматура в несколько раз прочнее обычной стальной, устойчива к коррозии, долговечна, обладает низкой теплопроводностью, малым весом, является диэлектриком, может поставляться в бухтах (мотках) значительной длины.

Среди главных ее недостатков по сравнению с металлической арматурой следует указать низкий модуль упругости (разница примерно в 4 раза) и относительное удлинение (разница примерно в 10 раз). Это приводит большим прогибам и трещинам в изгибаемых элементах [1, 2]. Композитная арматура характеризуется незначительной прочностью на сжатие, из нее невозможно изготовление гнутых изделий из прямой арматуры в состоянии поставки (прутки или мотки), ее невозможно сваривать. Кроме того, изделия с композитной арматурой обладают пониженной огнестойкостью.

Важной характеристикой полимерной арматуры является сцепление с бетоном и другими цементными композитами. Среди способов повышения сцепления отметим основные: периодический профиль арматуры при ее изготовлении; механическая анкеровка; различные напыления и обмазки, а также добавки в бетон для повышения сцепления [2, 3]. Профильную поверхность арматуры получают навивкой оплеточной нити, вдавливанием либо скручиванием полосового стержня (например, патент RU 150467 U1).

Для оценки прочности сцепления композитной арматуры используют два основных метода: балочный (испытанием армированной балки на изгиб) и метод



осевого выдергивания из бетонного куба. В ГОСТ 32492-2024, разработанном на основе ISO 10406-1:2025 [4], стандартизирован метод выдергивания из бетонного куба или цилиндра с фиксацией сдвигового усилия при проскальзывании арматуры на 0,25 мм. Разработаны и другие способы испытаний на выдергивание арматуры (например, патент RU 45023 U1).

На прочность сцепления композитной полимерной арматуры (АКП) с бетоном влияют различные факторы: прочность бетона, химическая адгезия, усадка бетона, длина заделки и диаметр арматуры, форма поперечного сечения стержня, вид и шаг навивки, условия среды, вид нагрузки и пр. [5].

В исследовании [6] изучалось влияние на прочность сцепления композитной арматуры напыления из нержавеющей стали, оксида титана, обработки плазмой, спиралевидной навивки и навивки периодического профиля. Установлено, что после пребывания в коррозионной среде в течение 6-ти месяцев сцепление арматуры с навивкой периодического профиля снизилось на 5,9 %, в то время как для других методов обработки снижение произошло на 11–22 %. Для гидрофобизированных образцов сцепление увеличивается на 60–66 %. Под воздействием водной среды сцепление композитной арматуры снижается на 15–24 % [7].

В статье [8] описаны результаты испытаний сцепления базальто- и стеклокомпозитной арматуры (АСК) с мелкозернистым бетоном. Установлено, что на прочность сцепления влияет шаг ребер на поверхности стержней периодического профиля. Наибольшая прочность сцепления наблюдалась у стержней с шагом ребер 15 и 20 мм. Согласно [9] прочность сцепления с бетоном АСК с периодически деформированным профилем составила 12,7 МПа, что соответствует требованиям ГОСТ 31938-2022. Указанный стандарт допускает снижение прочности сцепления после выдержки в щелочной среде с 12 до 10 МПа. При испытаниях сцепления с бетоном АСК с песчаной обсыпкой, наносимой при изготовлении, выявлено разрушение бетона и частично песчаной обсыпки АСК, что объясняется низкой прочностью связи между песком и полимерной арматурой.

Прочность на сжатие бетонной матрицы в диапазоне 25–40 МПа не оказывает сильного влияния на прочность сцепления, при увеличении прочности бетона до 40–65 МПа прочность сцепления с АКП значительно возрастает [10]. Добавки в бетон, повышающие его плотность, улучшают его сцепление с композитной арматурой [11]. Обзор более 1000 испытаний на выдергивание АКП из бетона показал влияние типа волокна, диаметра и поверхности стержня, длины анкерки, прочности бетона [12]. В результате обзора сделан вывод, что аналитических моделей для точного прогнозирования прочности сцепления все еще мало, и необходимо провести больше исследований.

Настоящее исследование проведено в рамках магистерской диссертации и направлено на изучение влияния различных обмазок на прочность сцепления.

Материалы и методы

Для сравнительных испытаний применялись стержни стекло-композитной арматуры АКП-АСК-8 по ГОСТ 31938-2022 диаметром 8 мм и стальная арматура d8A-III по ГОСТ 5781-82 (табл. 1).



Таблица 1

Параметры арматуры периодического профиля

Тип арматуры	Номинальный диаметр, мм	Внутренний диаметр, мм	Высота поперечных выступов, мм	Шаг поперечных выступов, мм
Стеклопластиковая арматура (АКП-АСК-8)	8,0	7,9	0,45	11,0
Стальная арматура $d8A$ -III	8,0	7,9	0,5	5,0

Согласно ГОСТ 31938-2022 предел прочности при растяжении для АСК – 1000 МПа, предел прочности сцепления с бетоном 12 МПа (при определенной величине проскальзывания). В качестве образцов для повышения сцепления АКП-АСК-8 с бетоном использовались адгезионные составы *Ceresit* СТ19, *MasterTop500* и клей ПВА.

Для изготовления кубов ребром 100 мм для испытания на вырывание стержней по ГОСТ 32492-2024 использовался пескобетон класса В25 производителя «Тайфун Мастер» стальные формы «тройки». Предварительно испытаниями кубов бетона был подтвержден класс В25, необходимый для стандартных испытаний на сцепление с арматурой. Образцы для испытаний изготавливались с использованием стальных муфт, арматуры АСК, эпоксидного клея и деревянных кондукторов для фиксации арматуры в теле твердеющих бетонных кубов.

Образец закреплялся в испытательной машине при помощи стального кондуктора. В нижний захват машины закрепляется испытательная муфта (рис. 1).

Нагружение образцов производилось на испытательной машине *WAW-600kN* поэтапно со скоростью не более чем 20 кН/мин. Фиксировались нагрузки, вызывающие проскальзывание АКП на 0,25 мм, или максимальное значение нагрузки, соответствующее разрыву АКП, или разрушению бетона, или проскальзыванию свободного конца на 2,5 мм. На испытательной машине фиксировались диаграмма «напряжение – относительное удлинение», пик максимальной нагрузки, перемещение.



Рис. 1. Испытательная машина и характер разрушения



При проскальзывании арматуры по границе сцепления определяется прочность сцепления с бетоном τ_r (в МПа):

$$\tau_r = \frac{P}{c \cdot L_{fd}}, \quad (1)$$

где P – прилагаемая нагрузка, Н; c – периметр поперечного сечения арматурного стержня по номинальному диаметру, мм; L_{fd} – длина участка сцепления стержня с бетоном, мм.

Результаты исследования

Результаты сравнительных испытаний сцепления с бетоном АСК с различными видами адгезионных обмазок, АСК и стальной арматуры без обмазки приведены в табл. 2. Наблюдался характер разрушения двух видов: вырыв арматуры (проскальзывание) и разрушения образца бетона (в виде вертикальной трещины). Вариация фиксируемой разрушающей нагрузки для АСК не превысила 8,31 %, для стальной арматуры – 16,78 %.

Таблица 2

Результаты испытаний сцепления арматуры с бетоном

Образец	Среднее усилие, кН	Вариация усилия, %	Характер разрушения
АСК с обмазкой <i>MasterTop500</i>	15,41	4,96	разрушение бетона
АСК с обмазкой ПВА	17,55	1,32	проскальзывание
АСК с обмазкой <i>Ceresit CT19</i>	15,10	3,44	проскальзывание
АСК (без обмазки)	15,95	8,31	разрушение бетона
Стальная арматура (без обмазки)	20,31	16,78	разрушение бетона

Как видим, примененные обмазки практически не повлияли на прочность сцепления АСК с бетоном: разница с результатами без обмазки составила для *MasterTop500* – минус 3,41 %, ПВА – 10,05 %, *Ceresit CT19* – минус 3,44 %. Сцепление стальной арматуры оказалось на 27,3 % выше (рис. 2).

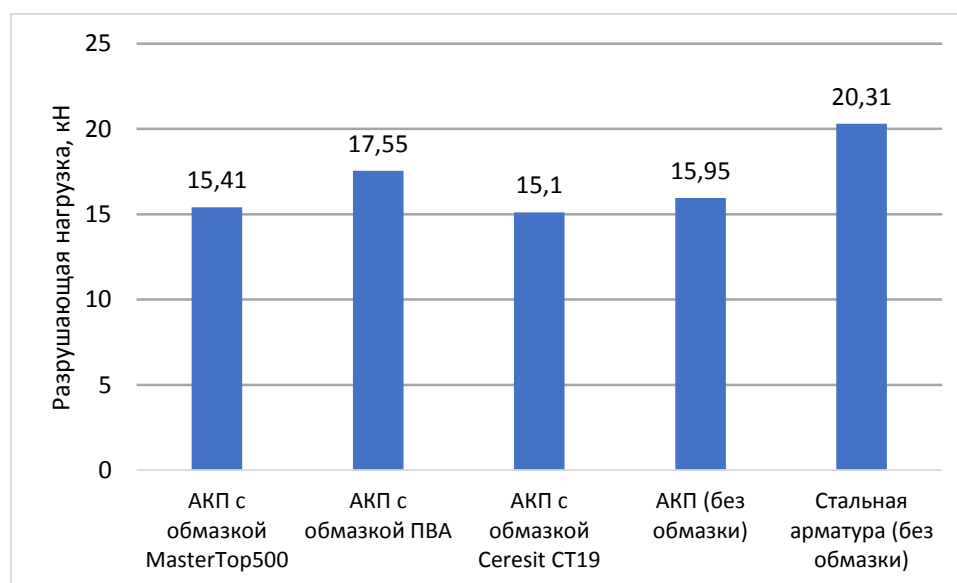


Рис. 2. Результаты испытаний сцепления арматуры с бетоном

Перерасчет разрушающей нагрузки в предел прочности сцепления с бетоном не производился поскольку, во-первых, она пропорциональна разрушающей нагрузке (см. формулу (1)), во-вторых, целью исследований ставилось определение влияния адгезионных обмазок на сцепление, что может быть установлено и по относительным разрушающим нагрузкам. Одинаковые условия эксперимента позволяют судить, что возможные погрешности испытаний одинаково влияли на результаты.

На следующем этапе исследований производились испытания самой арматуры АКП-АСК-8 на осевое растяжение (рис. 3).



Рис. 3. Испытания АКП на осевое растяжение: диаграмма «напряжение – удлинение» и характер разрушения

При растяжении стеклокомпозитной арматуры график «напряжение – относительное удлинение» имеет скачкообразный характер вплоть до самого разрушения. Скачки на графике указывают на то, что стеклопластиковый стержень не ведет себя предсказуемо, как однородный материал. Поведение арматуры под нагрузкой определяется последовательными удлинениями и разрушениями волокон и матрицы, как неоднородной структуры. Предел прочности при растяжении по результатам испытаний 891 МПа оказался несколько меньше установленного в ГОСТ 31938-2022 значения 1000 МПа.

Заключение

Примененные обмазки практически не повлияли на прочность сцепления стеклокомпозитной арматуры АКП-АСК-8 с бетоном: разница с результатами без обмазки составила для *MasterTop500* – минус 3,41 %, *Ceresit CT19* – минус 3,44 %, что сравнимо с погрешностями эксперимента. Обмазка ПВА повысила прочность сцепления на 10 %. Сцепление стальной арматуры периодического профиля того же диаметра оказалось на 27,3 % выше, чем у стеклокомпозитной арматуры. Предел прочности при растяжении арматуры АКП-АСК-8, определенный по результатам испытаний (891 МПа), оказался несколько меньше установленного в ГОСТ 31938-2022 значения 1000 МПа.



БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kosior-Kazberuk, M. Analysis of deflection and cracking of concrete beams with non-metallic reinforcement / M. Kosior-Kazberuk, J. Krassowska // *CzOTO*. – 2019. – Vol. 1 (1). – P. 782–789.
2. Diab, H. M. An Anchorage Technique for Shear Strengthening of RC T-Beams Using NSMBFRP Bars and BFRP Sheet / H. M. Diab, A. M. Sayed // *International Journal of Concrete Structures and Materials*. – 2020. – Vol. 14, Article No. 49.
3. Zhang, P. 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 (1). – 136943322094719.
4. ISO 10406-1:2025. Fibre-reinforced polymer (FRP) reinforcement of concrete – Test methods. Part 1: FRP bars.
5. Monaldo, E. Basalt-based fiber-reinforced materials and structural applications in civil engineering / E. Monaldo, F. Nerilli, G. Vairo // *Composite Structures*. – 2019. – Vol. 214. – P. 246–263.
6. Повышение сцепления композитной арматуры с цементными бетонами / С. В. Федосов, В. Е. Румянцева, В. С. Коновалова, И. В. Караваев // *Фундаментальные поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2018 году : научные труды РААСН : в 2-х томах / Российская академия архитектуры и строительных наук (РААСН) ; составители : Рогунова Г. И. [и др.]*. – Москва, 2019. – С. 555–562. – ISBN 978-5-4323-0513-8.
7. Богданова, Е. Р. Изменение свойств сцепления композитной полимерной арматуры с бетоном в условиях воздействия различных сред / Е. Р. Богданова // *Промышленное и гражданское строительство*. – 2016. – № 2. – С. 39–43.
8. 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 Дальневосточного федерального университета*. – 2020. – № 3 (44). – С. 139–150.
9. Ильин, Д. А. Исследование прочности сцепления с бетоном композитной арматуры с частично деформированным профилем / Д. А. Ильин, Д. В. Новолодская // *Умные композиты в строительстве*. – 2023. – Т. 4, № 1. – С. 7–16.
10. Başaran, B. A Review on the Physical Parameters Affecting the Bond Behavior of FRP Bars Embedded in Concrete / B. Başaran [et al.] // *Polymers*. – 2022. – Vol. 14 (9). – 1796.
11. Повышение прочности сцепления арматуры с бетоном посредством объемной гидрофобизации цементного камня / В. Е. Румянцева, В. С. Коновалова, А. А. Гальцев [и др.] // *Современные проблемы гражданской защиты*. – 2024. – № 3 (52). – С. 83–92.
12. Review on the bond behavior and durability of FRP bars to concrete / E. Nepomuceno, J. Sena-Cruz, L. Correia, T. D'Antino // *Construction and Building Materials*. – 2021. – Vol. 287. – 123042.

BAYBURIN Albert Khalitovich, doctor of technical sciences, associate professor, professor of the chair of building technologies and structural engineering; KLOCHKOVA Zlata Yurievna, master degree student of the chair of building technologies and structural engineering; BONDAR Anastasia Alekseevna, senior teacher of the chair of building technologies and structural engineering

THE ADHESION STRENGTH OF FRP (FIBER-REINFORCED POLYMER) TO CONCRETE

South Ural State University (SUSU).



76, Lenin Prospect, Chelyabinsk, 454080, Russia.

Tel.: (351) 267-91-83; e-mail: abayburin@mail.com

Key words: fiber reinforced polymer, glass-reinforced plastic, rebar profile, adhesion to concrete, adhesion strength, pull-out test.

The article presents the results of comparative tests of the adhesion strength of fiberglass reinforcement (FRP) with concrete using adhesive coatings. The method of determining adhesion, the testing equipment, and the devices used were in accordance with the standard. Four series of samples were tested with different adhesive coatings and without any coating. Based on the test results, the practical applicability of adhesive compounds for improving the adhesion of fiberglass reinforcement with concrete was evaluated.

REFERENCES

1. Kosior-Kazberuk M., Krassowska J. Analysis of deflection and cracking of concrete beams with non-metallic reinforcement. CzOTO. 2019. Vol. 1 (1). P. 782–789.
2. Diab H. M., Sayed A. M. An Anchorage Technique for Shear Strengthening of RC T-Beams Using NSMBFRP Bars and BFRP Sheet. International Journal of Concrete Structures and Materials. 2020. Vol. 14. Article No. 49.
3. Zhang P., [et al.] Influence of rib parameters on mechanical properties and bond behavior in concrete of fiber-reinforced polymer rebar. Advances in Structural Engineering. 2021. Vol. 24 (1). 136943322094719.
4. ISO 10406-1:2025. Fibre-reinforced polymer (FRP) reinforcement of concrete – Test methods. Part 1: FRP bars.
5. Monaldo E., Nerilli F., Vairo G. Basalt-based fiber-reinforced materials and structural applications in civil engineering. Composite Structures. 2019. Vol. 214. P. 246–263.
6. Fedosov S. V., Rumyantseva V. E., Konovalova V. S., Karavaev I. V. Povyshenie stsepleniya kompozitnoy armatury s tsementnymi betonami [Increasing the adhesion of FRP to cement concretes]. Fundamentalnye poiskovye i prikladnye issledovaniya RAASN po nauchnomu obespecheniyu razvitiya arkhitektury, gradostroitelstva i stroitelnoy otrasli Rossiiskoy Federatsii v 2018 godu [Fundamental research and applied studies of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences on the scientific support of the development of architecture, urban planning, and the construction industry in the Russian Federation in 2018]: Nauchnye trudy RAASN. T. 2. Moscow, Izd. ASV, 2019. P. 555–562.
7. Bogdanova E. R. Izmenenie svoystv stsepleniya kompozitnoy polimernoy armatury s betonom v usloviyakh vozdeystviya razlichnykh sred [Changes in the adhesion properties of FRP and concrete under various environmental conditions]. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo [Industrial and civil engineering]. 2016. № 2. P. 39–43.
8. Makarova N. V., Komarov A. I., Tsuprik V. G. Prochnostnye i deformatsionnye svoystva kontakta kompozitnoy armatury s melkozernistym betonom [Strength and deformation properties of the FRP contact with fine-grained concrete]. Vestnik inzhenernoy shkoly Dalnevostochnogo federalnogo universiteta [FEFU: School Engineering Bulletin]. 2020. № 3 (44). P. 139–150.
9. Ilin D. A., Novolodskaya D. V. Issledovanie prochnosti stsepleniya s betonom kompozitnoy armatury s chastichno deformirovannym profilem [Study of the adhesion strength of FRP with a partially deformed profile to concrete]. Umnye kompozity v stroitelstve [Smart composites in construction]. 2023. Vol. 4, № 1. P. 7–16.
10. Başaran B., [et al.] A Review on the Physical Parameters Affecting the Bond Behavior of FRP Bars Embedded in Concrete. Polymers. 2022. Vol. 14 (9). 1796.
11. Rumyantseva V. E., Konovalova V. S., Galtsev A. A. [et al.] Povyshenie prochnosti stsepleniya armatury s betonom posredstvom obemnoy gidrofobizatsii tsementnogo kamnya



[Increasing the bond strength between reinforcement and concrete by volumetric hydrophobization of the cement stone]. *Sovremennye problemy grazhdanskoy zashchity* [Modern problems of civil protection]. 2024. № 3 (52). P. 83–92.

12. Nepomuceno E., Sena-Cruz J., Correia L., D'Antino T. Review on the bond behavior and durability of FRP bars to concrete. *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 287, 123042.

© А. Х. Байбурин, З. Ю. Клочкова, А. А. Бондарь, 2026

Получено: 24.02.2026 г.