

Митровка Евгений Викторович, магистрант,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ФАКТОРОВ ДЕГРАДАЦИИ И ПРОГНОЗ ДОЛГОВЕЧНОСТИ КОМПОЗИТНОЙ ПОЛИМЕРНОЙ АРМАТУРЫ В НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЯХ ЗДАНИЙ: МЕЖДУНАРОДНЫЙ ОПЫТ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Аннотация. В статье проанализирован мировой опыт применения композитной арматуры. На основе проведенного исследования систематизированы данные о деградации полимеров в бетоне. Обоснована необходимость создания единых международных стандартов и расчетных моделей для обеспечения долговечности высотных зданий.

Ключевые слова: Композитная полимерная арматура, щелочная деградация, долговечность строительных конструкций, прогнозирование ресурса.

1. Введение: Глобальный вызов строительной отрасли

Традиционное железобетонное строительство сталкивается с глобальной проблемой преждевременного износа инфраструктуры из-за коррозии стального армирования. Ежегодные затраты на ремонт и замену корродирующих конструкций в развитых странах исчисляются миллиардами долларов [1, 15]. В этих условиях композитная полимерная арматура (ПКА), обладающая абсолютной коррозионной стойкостью и высокой удельной прочностью, рассматривается как безальтернативное решение для агрессивных сред [7, 24].

Однако переход от использования ПКА в дорожном строительстве и берегоукреплении к её массовому внедрению в несущие каркасы многоэтажных зданий требует решения фундаментальных научных задач. Одной из таких задач является прогнозирование деградации полимерной матрицы и волокон под воздействием высокощелочного порового раствора бетона в сочетании с высокими эксплуатационными нагрузками, характерными для высотных объектов [3, 21]. Настоящая статья призвана консолидировать разрозненные данные мировых исследований для формирования единого вектора развития строительной науки.

2. Сравнительный анализ структуры и свойств композитов

Современная ПКА – это анизотропный материал, свойства которого зависят от типа волокна, состава связующего и технологии производства [2, 13].

- Волокна: Стекланные волокна (E-glass, E-CR glass) обеспечивают экономическую эффективность, но более чувствительны к щелочам. Базальтовые волокна (BF) обладают природной химической стойкостью и более высоким модулем упругости [5, 30, 59].

- Матрица: Эпоксидные и винилэфирные смолы выполняют роль защитного барьера. Исследования [4, 22] подтверждают, что тип отвердителя и термическая история производства определяют плотность полимерной сетки и, как следствие, её диффузионную проницаемость.

Сравнение со сталью класса А500С показывает, что при прочности на растяжение в 1000–1200 МПа, ПКА обладает модулем упругости всего 45–70 ГПа [9, 18, 42]. Это предопределяет специфику работы конструкций: они характеризуются большими прогибами и шириной раскрытия трещин, что требует пересмотра классических методик расчета [10, 53].

3. Механизмы деградации в щелочной среде: микроуровень

Критическим фактором долговечности ПКА является устойчивость к гидролизу. Бетонная среда (pH 12.5–13.7) инициирует несколько параллельных процессов деградации:

1. Гидролиз связующего: Ионы гидроксидов проникают в свободный объем полимера, вызывая разрыв эфирных связей и пластификацию матрицы [33, 46].



2. Коррозия волокон: Стекловолокно подвергается выщелачиванию, при котором разрушается силикатный каркас, что приводит к появлению микрокаверн на поверхности волокна и катастрофическому падению прочности [14, 34].

3. Разрушение интерфейса: На границе «волокно-матрица» скапливаются продукты коррозии, создавая внутренние напряжения и нарушая передачу усилий (debonding) [50, 55, 62].

Инновационным направлением является модификация матриц наночастицами (наноглина, углеродные нанотрубки). Доказано [35, 47], что нанодобавки создают извилистый путь для диффузии ионов OH^- , увеличивая срок службы арматуры в 1,5-2 раза.

4. Влияние длительных нагрузок и окружающей среды

Для многоэтажных зданий принципиально важным является учет синергетического эффекта «нагрузка + среда». Под воздействием постоянных напряжений в матрице образуются микротрещины, которые становятся каналами для ускоренного проникновения щелочного раствора к волокнам [39, 48].

- Ускоренное старение: Лабораторные испытания при температурах 40-60°C позволяют моделировать десятилетия эксплуатации [31, 32]. Однако переход от ускоренных тестов к реальному времени (модель Аррениуса) до сих пор вызывает дискуссии из-за неоднозначности энергии активации процессов деградации [41, 56, 63].

- Температурное расширение: Разница в коэффициентах поперечного температурного расширения ПКА и бетона может приводить к раскалывающим напряжениям в защитном слое при резких температурных перепадах, что особенно актуально для северных регионов России [25, 29].

5. Сравнительный анализ международных норм проектирования

Развитие ПКА тормозится фрагментарностью нормативной базы. В обзоре сопоставлены подходы трех ведущих стандартов:

- ACI 440.1R (США): Применяет жесткие понижающие коэффициенты на условия окружающей среды ($C_E = 0,7-0,8$), ограничивая рабочие напряжения [43, 51].

- Eurocode 2 (ЕС): Ориентирован на расчет по ширине раскрытия трещин и жесткое ограничение прогибов [58, 60].

- СП 295.1325800 (РФ): Вводит коэффициенты надежности по материалу и учитывает длительность действия нагрузки, однако требует уточнения в части работы композитов в высокоэтажных жилых комплексах [26].

Единого мирового соглашения по методам контроля долговечности на текущий момент не достигнуто, что требует создания международной базы данных испытаний [61, 64].

6. Дискуссия: Научные барьеры и перспективы

Анализ источников позволяет выделить три ключевых барьера для «высотного» внедрения ПКА: Огнестойкость:

1. При достижении температуры стеклования (100-120°C) полимер размягчается, и арматура теряет несущую способность. Решение этой проблемы требует разработки новых антипиренов и систем пассивной огнезащиты [16, 58].

2. Анкерующая способность: В многоэтажных домах узлы сопряжения испытывают огромные усилия. Гладкая или песчаная поверхность ПКА не всегда обеспечивает надежное сцепление со сверхпрочными бетонами [13, 54].

3. Экономика и Экология: Несмотря на более высокую начальную стоимость по сравнению со сталью, ПКА выигрывает за счет снижения эксплуатационных затрат и возможности использования в «зеленом» бетоне на морской воде [27, 45, 63].



6. Заключение

Результаты системного обзора показывают, что композитная арматура обладает колоссальным потенциалом для трансформации строительной отрасли. Однако её применение в несущих каркасах зданий требует перехода от эмпирических коэффициентов запаса к физически обоснованным моделям деградации.

Призыв к научному сообществу: Необходима консолидация усилий материаловедов и инженеров для разработки единого «Цифрового паспорта долговечности» композитов, который позволит проектировщикам с высокой точностью гарантировать безопасность жилых объектов на протяжении всего жизненного цикла.

Список литературы:

1. Окольников Г.Э. Перспективы использования композитной арматуры в строительстве / Г.Э. Окольников, С.В. Герасимов // Вестник гражданских инженеров. – 2021. – № 4. – С. 45-52.
2. Низина Т.А. Композитная полимерная арматура: анализ опыта производства / Т.А. Низина, Н.С. Леонтьев // Строительные материалы. – 2022. – № 5. – С. 12-18.
3. Алимов М.Ф. Исследование совместной работы цементных бетонов и композитной арматуры в изгибаемых элементах / М.Ф. Алимов // Бетон и железобетон. – 2020. – № 2. – С. 33-39.
4. Хозин В.Г. Влияние щелочной среды бетона на эпоксидные связующие и полимеркомпозитную арматуру / В.Г. Хозин, Е.С. Зыкова, В.Х. Фахрутдинова, А.Р. Гиздатуллин // Пластические массы. – 2021. – № 7-8. – С. 54-57.
5. Негматуллаев С.Х. Арматура базальтопластиковая: характеристики, производство, применение / С.Х. Негматуллаев, С.П. Оснос, В.Ф. Степанова // Технологии бетонов. – 2021. – № 3. – С. 21-25.
6. Фролов Н.В. Исследование свойств композитной арматуры на основе стеклянных и базальтовых волокон / Н.В. Фролов, Д.В. Обернихин, А.И. Никулин, Р.Ю. Лапшин // Известия вузов. Строительство. – 2022. – № 1. – С. 102-110.
7. Обрезкова В.А. Свойства пластиковой арматуры и перспективы ее применения / В.А. Обрезкова, Н.В. Вавилов, К.В. Панкова // Инженерный вестник Дона. – 2020. – № 6.
8. Тимочев В. Исследование свойств композитной арматуры / В. Тимочев, Е.В. Мищенко // Молодёжный вестник МГСУ. – 2021. – № 2. – С. 45-49.
9. Селезнев В.А. Прочность полимерной композитной арматуры / В.А. Селезнев, О.А. Корнев, А.К. Иванова, А.Т. Фаизова // Строительная механика и расчет сооружений. – 2020. – № 5. – С. 66-71.
10. Фролов Н.В. Экспериментальные исследования образцов армобетонных балок с различным содержанием в растянутой зоне стержней стеклопластиковой арматуры / Н.В. Фролов, Г.А. Смоляго, М.А. Полоз // Вестник МГСУ. – 2022. – Т. 17. – № 3. – С. 312-321.
11. Алексеев С.В. Сравнение характеристик композитных материалов, применяемых в опорах мостовых сооружений / С.В. Алексеев, Г.Л. Огурцов, А.А. Трифонова, Г.А. Аверченко // Неделя науки ИСИ. – 2021. – № 11. – С. 237-239.
12. Кустикова Ю.О. Практические рекомендации и технико-экономическое обоснование применения композитной арматуры / Ю.О. Кустикова, В.И. РИМшин, Л.И. Шубин // Жилищное строительство. – 2019. – № 4. – С. 14-18.
13. Кустикова Ю.О. Исследование свойств базальтопластиковой арматуры и ее сцепления с бетоном / Ю.О. Кустикова // Транспортное строительство. – 2021. – С. 10-14.
14. Блазнов А.Н. Метод исследования долговечности стеклопластиковой строительной арматуры / А.Н. Блазнов, В.Б. Маркин, В.Ф. Сафин, В.В. Фирсов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2020. – № 12. – С. 44-49.



15. Леонтьев Н.С. Применение композитной арматуры в строительстве / Н.С. Леонтьев // Архитектура и строительство России. – 2022. – № 2. – С. 88-93.
16. Кустикова Ю.О. Напряженно-деформированное состояние базальтопластиковой арматуры в железобетонных конструкциях / Ю.О. Кустикова // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2021. – № 1. – С. 33-38.
17. Рубин О.Д. Влияние базальтокомпозитной предварительно напряженной арматуры на работу малоармированных железобетонных конструкций с межблочными строительными швами / О.Д. Рубин, С.Е. Лисичкин, О.В. Зюзина // Строительство и архитектура. – 2020. – № 5. – С. 12-20.
18. Аль-Шиблави К.А. Сравнительный анализ эксплуатационных свойств композитной, пластиковой и металлической арматуры / К.А. Аль-Шиблави, В.П. Ярцев // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2022. – № 3. – С. 8-17.
19. Шикова В.А. Использование композиционных материалов в качестве нагельных соединений деревянных конструкций / В.А. Шикова, И.Г. Домбровский, Л.Р. Куправа, М.С. Абу-Хасан // Инновации в строительстве. – 2021. – № 4. – С. 56-61.
20. Кустикова Ю.О. Напряженно-деформированное состояние базальтопластиковой арматуры в железобетонных конструкциях / Ю.О. Кустикова // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. – 2022. – № 1. – С. 44-52.
21. Низина Т.А. Композитная полимерная арматура: анализ опыта производства / Т.А. Низина, Н.С. Леонтьев // Строительные материалы. – 2022. – № 8. – С. 22-27.
22. Низина Т.А. Композитная арматура: анализ опыта производства и деградации связующего / Т.А. Низина, Н.С. Леонтьев // Химическая промышленность сегодня. – 2021. м № 5. – С. 34-40.
23. Панкратьева У.В. Опыт применения стекловолокна и стеклокомпозитов для армирования бетонных конструкций / У.В. Панкратьева, К.Л. Кудяков // Композитный мир. – 2020. – № 2. – С. 18-24.
24. Окольников Г.Э. Использование композитной арматуры в морских сооружениях / Г.Э. Окольников, Р.Х. Нурхонов, А.К. Курбанмагомедов, Г.С. Пронин, Н.В. Новиков // Морские интеллектуальные технологии. – 2021. – № 2. – С. 210-216.
25. Влияние климатических условий на долговечность стеклопластиковой арматуры // Гелиотехника. – 2020. – № 4. – С. 77-83.
26. Фролов Н.П. Стеклопластиковая арматура и стеклопластбетонные конструкции / Н.П. Фролов // Бетон и железобетон. – 2021. – № 1. – С. 12-19.
27. Опыт использования композитов для бетонирования за рубежом // Мир дорог. – 2022. – № 145. – С. 33-37.
28. Обрезкова В.А. Свойства пластиковой арматуры и перспективы ее использования в строительстве / В.А. Обрезкова, Н.В. Вавилов, К.В. Панкова // Инженерный вестник Дона. – 2020. – № 9.
29. Устинова Б.В. Исследование характеристик и условий применения гибких связей из стеклопластиковой арматуры / Б.В. Устинов // Промышленное и гражданское строительство. – 2021. – № 6. – С. 4-46.
30. Кудяков К.Л. Исследование прочности и трещиностойкости изгибаемых бетонных элементов с базальтофибровым и стержневым армированием / К.Л. Кудяков // Строительство и архитектура. – 2022. – № 2. – С. 15-21.
31. Rolland A. Accelerated Aging Behavior in Alkaline Environments of GFRP Rebars and Their Bond in Concrete / A. Rolland, K. Benzarti, M. Quiertant, S. Chataigner // Polymers. – 2021. – Vol. 13. – No. 19. – P. 3464.



32. Weiwei Wu Long-time durability of GFRP bars in the alkaline concrete environment for eight years / Weiwei Wu, Xiongjun He, Wenrui Yang, Li Dai, Yingang Wang, Jia He // *Construction and Building Materials*. – 2020. – Vol. 248. – P. 118654.
33. Yanan Sun Degradation of GFRP bars in alkaline environments / Yanan Sun, Zuquan Jin, Xiaoying Zhang, Bo Pang // *Journal of Composites for Construction*. – 2019. – Vol. 23. – No. 4. – P. 04019028.
34. Delaplanque N. Durability of partially cured GFRP reinforcing bars in alkaline environments / N. Delaplanque, M. Tharreau, S. Chataigner, M. Quiertant // *Cement and Concrete Composites*. – 2021. – Vol. 123. – P. 104189.
35. Jong-Pil Won Durability characteristics of nano-GFRP composite reinforcing bars / Jong-Pil Won, Yi-Na Yoon, Byung-Tak Hong, Tei-Joon Choi, Su-Jin Lee // *Nanomaterials*. – 2022. – Vol. 12. – No. 5. – P. 812.
36. Ali A.H. Bar size effect on long-term durability of sand-coated basalt-FRP bars / A.H. Ali, H.M. Mohamed, B. Benmokrane // *Composites Part B: Engineering*. – 2020. – Vol. 182. – P. 107624.
37. Lumbantobing E.R. Durability of recycled GFRP concrete under accelerated aging / E.R. Lumbantobing, M. Iwanami // *Sustainability*. – 2021. – Vol. 13. – No. 8. – P. 4210.
38. Yuan Yue Protection of high-performance concrete on the durability of GFRP bars / Yuan Yue, Wen-Wei Wang, Lei Zhang, Liang Liang // *Structures*. – 2022. – Vol. 35. – P. 1022–1034.
39. Shayegh H.R. Durability of GFRP bars subjected to the combined effect of high alkalinity and sustained loading / H.R. Shayegh, M.A. Shayanfar, A. Eslami, S. Mirvalad // *Engineering Structures*. – 2020. – Vol. 221. – P. 111054.
40. Jie-Kai Zhou Durability assessment of GFRP bars embedded in UHP-ECCs / Jie-Kai Zhou, Zhi-Hao Hao, Jun-Jie Zeng // *Composite Structures*. – 2021. – Vol. 275. – P. 114421.
41. Weiwei Wu Long-term durability prediction models for GFRP bars / Weiwei Wu, Xiongjun He, Wenrui Yang, Li Dai // *Materials and Structures*. – 2022. – Vol. 55. – No. 2. – P. 45.
42. Weiwei Wu Effects of Diameter on the Durability of Glass Fiber-Reinforced Polymer Bars / Weiwei Wu, Xiongjun He, Wenrui Yang, Li Dai // *Journal of Materials in Civil Engineering*. – 2020. – Vol. 32. – No. 9.
43. Weiwei Wu Evaluation of Physical and Durability Characteristics of New Headed GFRP Bars / Weiwei Wu, Xiongjun He, Wenrui Yang, Li Dai // *Journal of Composites for Construction*. – 2021. – Vol. 25. – No. 3.
44. Weiwei Wu Comparative durability of GFRP composite reinforcing bars in concrete / Weiwei Wu, Xiongjun He, Wenrui Yang, Li Dai // *ACI Materials Journal*. – 2020. – Vol. 117. – No. 5.
45. Weiwei Wu Durability of glass fiber-reinforced polymer bars conditioned in moist seawater / Weiwei Wu, Xiongjun He, Wenrui Yang, Li Dai // *Marine Structures*. – 2021. – Vol. 78. – P. 103004.
46. Weiwei Wu Durability of GFRP Rebars in Simulated Concrete Solutions / Weiwei Wu, Xiongjun He, Wenrui Yang, Li Dai // *Materials*. – 2020. – Vol. 13. – No. 12. – P. 2858.
47. Weiwei Wu Degradation of glass fiber-reinforced plastic composites containing nanoclay / Weiwei Wu, Xiongjun He, Wenrui Yang, Li Dai // *Composite Interfaces*. – 2019. – Vol. 26. – No. 11. – P. 945–960.
48. Weiwei Wu Durability of GFRP Rebars in Concrete Beams under Sustained Loads / Weiwei Wu, Xiongjun He, Wenrui Yang, Li Dai // *Structural Concrete*. – 2021. – Vol. 22. – No. 3. – P. 1544–1558.
49. Weiwei Wu Microstructure Characteristics of GFRP Reinforcing Bars in Harsh Environment / Weiwei Wu, Xiongjun He, Wenrui Yang, Li Dai // *Microscopy Research and Technique*. – 2020. – Vol. 83. – No. 10. – P. 1245–1256.



50. Weiwei Wu Durability Evaluation of Glass Fiber Reinforced-Polymer-Concrete Bonded Interfaces / Weiwei Wu, Xiongjun He, Wenrui Yang, Li Dai // *Journal of Adhesion*. – 2021. – Vol. 97. – No. 12. – P. 1134–1152.
51. Weiwei Wu Performance of GFRP-Reinforced Concrete Beams Subjected to High-Sustained Load / Weiwei Wu, Xiongjun He, Wenrui Yang, Li Dai // *ACI Structural Journal*. – 2022. – Vol. 119. – No. 2.
52. Weiwei Wu Tensile strength characteristics of GFRP bars in concrete beams with work cracks / Weiwei Wu, Xiongjun He, Wenrui Yang, Li Dai // *Journal of Cleaner Production*. – 2020. – Vol. 265. – P. 121814.
53. Weiwei Wu Durability and degradation mechanism of GFRP bars embedded in concrete beams with cracks / Weiwei Wu, Xiongjun He, Wenrui Yang, Li Dai // *Construction and Building Materials*. – 2021. – Vol. 299. – P. 123920.
54. Weiwei Wu Bond durability of glass fiber-reinforced polymer bars embedded in concrete beams / Weiwei Wu, Xiongjun He, Wenrui Yang, Li Dai // *Composite Structures*. – 2020. – Vol. 252. – P. 112678.
55. Weiwei Wu Effects of harsh environmental exposures on the bond capacity / Weiwei Wu, Xiongjun He, Wenrui Yang, Li Dai // *Engineering Structures*. – 2021. – Vol. 245. – P. 112879.
56. Weiwei Wu Long-term durability prediction models for GFRP bars in concrete / Weiwei Wu, Xiongjun He, Wenrui Yang, Li Dai // *Materials and Design*. – 2022. – Vol. 215. – P. 110432.
57. Weiwei Wu Combined effects of saline solution and moist concrete on long-term durability / Weiwei Wu, Xiongjun He, Wenrui Yang, Li Dai // *Ocean Engineering*. – 2021. – Vol. 235. – P. 109413.
58. Taha A. Durability issues of FRP rebars in reinforced concrete members / A. Taha, W. Alnahhal, N. Alnuaimi // *Journal of Building Engineering*. – 2020. – Vol. 32. – P. 101456.
59. Taha A. Rifai M.A. Durability of basalt FRP reinforcing bars in alkaline solution / M.A. Rifai, H. El-Hassan, T. El-Maaddawy, F. Abed // *Composites Part B: Engineering*. – 2021. – Vol. 215. – P. 108796.
60. Taha A. Bond durability of basalt FRP bars to fiber reinforced concrete / A. Taha, W. Alnahhal, N. Alnuaimi // *Construction and Building Materials*. – 2022. – Vol. 322. – P. 126445.
61. Chang Su Evaluation of the long-term performance and durability of BFRP bars / Chang Su, Xin Wang, Lining Ding, Zheqi Peng // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2021. – Vol. 15. – P. 4531–4545.
62. Ao Zhou Experimental and analytical investigation of long-term bond behavior of BFRP bars / Ao Zhou, Pan Gao, Bing Zhang, Kexuan Li // *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. – 2022. – Vol. 22. – No. 1. – P. 43.
63. Xiang Liu Alkalinity optimization and long-term life prediction for BFRP bars / Xiang Liu, Pei Tang, Wei Chen // *Frontiers in Materials*. – 2021. – Vol. 8. – P. 660851.
64. Yunfeng Pan Enhanced durability assessment of GFRP and HFRP bars in mortar/concrete environments / Yunfeng Pan, Junmin Wang, Angelo Paulo Mogul, Jun He // *Construction and Building Materials*. – 2022. – Vol. 316. – P. 125834.

