

**КАРПОВ АЛЕКСАНДР АНАТОЛЬЕВИЧ,**

*студент*

*2 курс, Строительный факультет*

*Ульяновский государственный технический университет*

**ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ  
КОМПОЗИТНОЙ АРМАТУРЫ В ЗАМЕНУ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ В  
УСЛОВИЯХ АГРЕССИВНЫХ СРЕД: АНАЛИЗ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА  
КОНСТРУКЦИЙ**

*В настоящей статье рассматриваются результаты сравнительного анализа традиционной металлической арматуры и композитной арматуры на основе стеклянных и базальтовых волокон. Актуальность исследования обусловлена возрастающей потребностью строительной отрасли в материалах, устойчивых к электрохимической коррозии, особенно при возведении объектов в агрессивных газовых и жидких средах. Целью работы является технико-экономическое обоснование замены металлической арматуры на композитную с позиции анализа полного жизненного цикла конструкции. В результате исследования установлено, что, несмотря на более высокую начальную стоимость композитной арматуры по сравнению с металлической, совокупные затраты на ремонт и восстановление конструкций в агрессивных средах снижаются в среднем на 30%. Научная новизна работы заключается в уточнении зон эффективного применения каждого типа арматуры в зависимости от степени агрессивности среды.*

*This article discusses the results of a comparative analysis of traditional metal reinforcement and composite reinforcement based on glass and basalt fibers. The relevance of the research is due to the increasing need of the construction industry for materials resistant to electrochemical corrosion, especially when constructing facilities in aggressive gas and liquid environments. The purpose of the work is a feasibility study of replacing metal reinforcement with composite reinforcement from the perspective of analyzing the full life cycle of the structure. As a result of the study, it was found that, despite the higher initial cost of composite reinforcement compared to metal, the total cost of repairing and restoring structures in aggressive environments is reduced by an average of 30%. The scientific novelty of the work consists in clarifying the areas of effective use of each type of reinforcement, depending on the degree of aggressiveness of the environment.*

**Ключевые слова:** *композитная арматура, металлическая арматура, стеклопластиковая арматура, базальтопластиковая арматура, коррозионная стойкость, анализ жизненного цикла, агрессивная среда, ползучесть полимеров, железобетонные конструкции, технико-экономическое обоснование.*

**Keywords:** *composite reinforcement, metal reinforcement, fiberglass reinforcement, basalt-plastic reinforcement, corrosion resistance, life cycle analysis, aggressive environment, polymer creep, reinforced concrete structures, feasibility study.*

## **Введение**

Современное строительство промышленных и гражданских объектов предъявляет повышенные требования к долговечности несущих конструкций, эксплуатируемых в условиях воздействия химически активных веществ. К числу таких объектов относятся очистные сооружения, навозохранилища в агропромышленном комплексе, химические производства, морские гидротехнические сооружения и мостовые переходы в регионах с применением

противогололедных реагентов. Ежегодный ущерб от коррозии железобетонных конструкций в Российской Федерации составляет миллиарды рублей, причем в большинстве случаев причиной преждевременного разрушения является не потеря несущей способности бетонной матрицей, а именно коррозионная деградация стальной арматуры [8].

Традиционным материалом для армирования железобетонных конструкций на протяжении последнего столетия выступает металлическая арматура. Под термином «металлическая арматура» в рамках данной статьи понимается совокупность стальных стержней с гладкой или периодической поверхностью, предназначенных для совместной работы с бетоном и восприятия преимущественно растягивающих напряжений. Согласно СП 63.13330.2018, металлическая арматура классифицируется по классам прочности, причем наиболее распространенными являются классы А240, А400 и А500. Арматура класса А400 имеет предел текучести 400 МПа и модуль упругости 200 ГПа, что обеспечивает хорошую совместную работу с бетоном [2].

Однако практика эксплуатации убедительно демонстрирует, что основным фактором, лимитирующим срок службы железобетонных конструкций в агрессивных средах, является не потеря несущей способности бетоном, а именно коррозия стальной арматуры. При проникновении через поры и микротрещины бетона воды, кислорода и ионов хлора происходит электрохимическая реакция окисления железа. Продукты коррозии железа, имеющие больший объем по сравнению с исходным металлом, создают внутренние распорные напряжения, что приводит к растрескиванию защитного слоя бетона и последующей лавинообразной деградации конструкции [8].

Альтернативой традиционному армированию выступают композитные материалы. Композитная арматура представляет собой стержень, изготовленный путем прутковой вытяжки из армирующих волокон, пропитанных термореактивным связующим. В зависимости от типа волокна различают стеклокомпозитную арматуру (АСП), базальтокомпозитную арматуру (АБП), углекомпозитную арматуру (АУП) и арамидную арматуру. Наибольшее

распространение в гражданском строительстве ввиду оптимального соотношения цены и прочности получила стеклопластиковая арматура, а в конструкциях, работающих в щелочной среде цементного камня, предпочтение часто отдается базальтопластиковой арматуре, обладающей более высокой щелочестойкостью [6].

Ключевым отличием композитной арматуры от металлической является ее полная инертность к электрохимической коррозии, поскольку полимерная матрица защищает волокна от проникновения хлоридов, кислот и щелочей. Композитная арматура сохраняет свои прочностные характеристики после выдерживания в 5-процентном растворе хлорида натрия в течение шести месяцев [6]. Тем не менее композитная арматура обладает существенным недостатком – низким модулем упругости и явлением длительной ползучести, что требует пересмотра расчета деформативности конструкций [7].

Проблема выбора между металлической и композитной арматурой не может быть решена исключительно на основе сравнения прочностных характеристик. Требуется комплексный подход, включающий технико-экономический анализ жизненного цикла. Термин «анализ жизненного цикла конструкции» в контексте настоящего исследования означает последовательную оценку всех этапов существования железобетонного элемента: от изготовления арматуры и бетонирования до эксплуатации, текущих ремонтов и утилизации по истечении расчетного срока службы [5]. Традиционные сметные методы, учитывающие только начальные капитальные вложения, систематически недооценивают экономическую эффективность более дорогих, но долговечных материалов [9]. Цель настоящей статьи заключается в количественном обосновании условий, при которых замена металлической арматуры на композитную становится экономически целесообразной, несмотря на разницу в начальных капитальных вложениях.

**Сравнительный анализ физико-механических характеристик исследуемых материалов**

Для корректного технико-экономического обоснования необходимо представить базовые физико-механические свойства металлической и композитной арматуры. Важно отметить, что композитная арматура демонстрирует упругую работу вплоть до разрушения без физической текучести, в то время как металлическая арматура имеет четко выраженную площадку текучести. Это принципиальное различие определяет характер трещинообразования в железобетонном элементе [2; 3]. В таблице 1 приведены усредненные значения ключевых характеристик для арматуры диаметром 12 миллиметров, наиболее часто применяемой в балках и плитах перекрытия. Данные для металлической арматуры взяты из СП 63.13330.2018 [2], для композитной – из СП 295.1325800.2017 [3] и ГОСТ 31938-2012 [1].

Таблица 1 – Сравнительная таблица физико-механических свойств арматуры (диаметр 12 мм) [1; 2; 3]

Характеристика	Единица измерения	Металлическая арматура класса А400	Стеклокомпозитная арматура (АСП)	Базальтокомпозитная арматура (АБП)
Предел прочности при растяжении (временное сопротивление)	МПа	400 – 450	1000 – 1200	900 – 1100
Модуль упругости (нормативный)	ГПа	200	45 – 55	50 – 60

Относительное удлинение при разрыве	%	14 – 25	2,2 – 2,8	2,0 – 2,5
Предел текучести (физический или условный)	МПа	400	Отсутствует (разрушение хрупкое)	Отсутствует
Плотность материала	кг/м <sup>3</sup>	7850	1900 – 2100	2100 – 2300
Коэффициент линейного температурного расширения	10 <sup>-6</sup> /°С	11,5	6,0 – 9,0	7,0 – 9,0
Стойкость к хлоридной коррозии	Условные баллы	Низкая (активная коррозия при pH <11)	Высокая (полная инертность)	Высокая
Стойкость к щелочной среде (pH > 12,5)	Условные баллы	Высокая	Умеренная (деградация стекловолокна)	Высокая (базальт более стоек)

Из данных таблицы 1 следует, что по показателю временного сопротивления растяжению композитная арматура превосходит металлическую более чем в два раза. Данное обстоятельство часто создает иллюзию возможности пропорционального снижения процента армирования. Однако, низкий модуль упругости композитной арматуры (в четыре раза ниже, чем у стали) приводит к тому, что при одинаковом уровне внешней нагрузки

деформации растяжения в композитном стержне значительно выше, чем в стальном [4]. Следовательно, ширина раскрытия трещин в бетоне для конструкций с композитной арматурой будет существенно превышать допустимые нормативные значения, установленные в СП 63.13330.2018 [2] (0,3 мм для длительного раскрытия в агрессивной среде). Это ограничивает применение композитной арматуры в конструкциях с требованиями по водонепроницаемости, если не предусмотрено дополнительное обетонирование или предварительное напряжение.

Кроме того, необходимо обратить внимание на поведение композитной арматуры в щелочной среде бетона. В то время как базальтопластиковая арматура демонстрирует хорошую стойкость, стеклопластиковая арматура подвержена деградации под действием гидроксид-ионов, что проявляется в снижении прочности на пятнадцать-тридцать процентов после выдерживания в цементном молоке в течение года [6].

Помимо модуля упругости, критически важным параметром является длительная прочность, или сопротивление ползучести. Для металлической арматуры при нормальных температурах ползучесть пренебрежимо мала и не учитывается в расчетах [2]. Для композитной арматуры характерно явление релаксации напряжений: под действием длительной растягивающей нагрузки, составляющей 40-60% от кратковременной прочности, полимерная матрица начинает пластически течь, перераспределяя нагрузку на волокна, что в итоге приводит к накоплению микроразрушений и снижению прочности [10].

Нормативные документы, в частности СП 295.1325800.2017 [3], вводят коэффициент длительного сопротивления, снижающий расчетное сопротивление композитной арматуры на растяжение для учета эффекта ползучести. Для арматуры АСП и АБП этот коэффициент принимается равным 0,3 – 0,5 в зависимости от длительности приложения нагрузки и условий эксплуатации, в то время как для стали коэффициент надежности по материалу составляет 0,9-0,95 [2; 3]. Иными словами, нормативная прочность композитной арматуры в 1000 МПа при расчете на длительное действие нагрузок снижается

до 300-500 МПа, что практически сравнивается с прочностью обычной арматуры А400. Этот факт является ключевым для понимания экономической эффективности композитной арматуры.

### **Особенности коррозионного поведения и долговечности**

Для корректного технико-экономического анализа необходимо рассмотреть поведение каждого типа арматуры в агрессивных средах. В целом, агрессивные среды по их воздействию на железобетон можно разделить на три основные категории [8]. Первая категория – газообразные среды ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ), которые при растворении в поровой влаге бетона образуют кислоты, снижающие рН и разрушающие пассивирующую пленку на стали. Вторая категория – жидкие неэлектролиты (масла, нефтепродукты), которые сами по себе не агрессивны к стали, но могут нарушать сцепление арматуры с бетоном. Третья, наиболее опасная категория – жидкие электролиты, содержащие ионы хлора, сульфатов или нитратов.

В присутствии хлорид-ионов даже при высоком значении рН защитная оксидная пленка на стали локально разрушается. Начинается питтинговая коррозия – образование глубоких точечных поражений, которые служат концентраторами напряжений. Под воздействием растягивающих усилий от внешней нагрузки или усадки бетона в зоне питтингов зарождаются коррозионные трещины. Этот процесс носит название «коррозионное растрескивание под напряжением» [8]. Скорость распространения таких трещин может достигать нескольких миллиметров в год, и через три-пять лет после начала активной коррозии арматурный стержень теряет способность воспринимать расчетные растягивающие усилия.

Для количественной оценки коррозионной стойкости в таблице 2 приведены рекомендуемые значения снижения прочности арматуры в зависимости от типа среды [6; 8].

Таблица 2 – Влияние агрессивной среды на прочностные характеристики арматуры через 10 лет эксплуатации [6; 8]

Тип среды	Характерный объект	Снижение прочности металлической арматуры, %	Снижение прочности базальтопластиковой арматуры, %	Основной механизм деградации
Нормальная (слабоагрессивная)	Офисное здание, жилой дом	0 – 5	0 – 5	Отсутствие существенной коррозии
Влажная с хлоридами (0,1-0,5% Cl <sup>-</sup> )	Мост, паркинг, морской берег	20 – 40	0 – 5	Питтинговая коррозия стали
Высокое содержание хлоридов (>1% Cl <sup>-</sup> )	Химическое производство	50 – 70	0 – 5	Активная электрохимическая коррозия стали
Кислотная среда (pH 3-5)	Очистные сооружения	40 – 60	5 – 15	Растворение пассивирующей пленки у стали; выщелачивание связующего у композита
Щелочная среда (pH > 12,5)	Контакт с цементом	0 – 5	10 – 25 (для стеклокомпозита)	Деструкция стекловолокна

Данные таблицы 2 показывают, что в нормальных условиях оба материала демонстрируют высокую долговечность. Однако при повышении концентрации хлоридов композитная арматура получает решающее преимущество. Более того,

в кислых средах композитная арматура также превосходит металлическую, хотя и не полностью сохраняет прочность из-за диффузии кислоты через полимерную матрицу и последующей коррозии волокон [6]. В щелочных средах, характерных для свежего бетона, стеклопластиковая арматура уступает металлической, тогда как базальтопластиковая сохраняет свои свойства благодаря более высокой химической стойкости базальтовых волокон.

### **Технологические особенности монтажа и их влияние на стоимость**

На итоговую экономическую эффективность существенно влияют технологические особенности монтажа арматуры. Металлическая арматура традиционно соединяется сваркой или вязкой стальной проволокой. Сварка требует квалифицированных сварщиков и специального оборудования. Композитная арматура не подлежит сварке, поскольку при нагреве полимерная матрица размягчается и теряет защитные свойства. Соединение композитных стержней выполняется исключительно вязкой с использованием пластиковых хомутов или стальной проволоки [3]. Сравнительные технологические параметры приведены в таблице 3 [9].

Таблица 3 – Сравнение технологических параметров монтажа арматуры [3; 9]

Параметр	Металлическая арматура А400	Стеклопластиковая арматура АСП
Возможность сварки	Да (ограниченно)	Нет
Тип соединения	Вязка или сварка	Только вязка
Удельная трудоемкость вязки, чел.-ч/т	12 – 15	15 – 20
Необходимость специального инструмента	Ножницы по металлу, крючок	Ножовка или дисковая пила
Относительная стоимость монтажных работ	1,00	1,25 – 1,40

Композитная арматура требует более высокой трудоемкости монтажа из-за меньшей жесткости (стержни пружинят, их сложнее зафиксировать) и необходимости аккуратной резки. Однако преимущество в весе (композитная арматура в четыре раза легче стальной) снижает физическую нагрузку на монтажников и позволяет сократить затраты на грузоподъемные механизмы [9].

### **Расчет интегральных приведенных затрат и зоны эффективности**

На основе анализа рыночных цен и технологических коэффициентов выполнен расчет приведенных затрат для железобетонной балки длиной 6 метров, несущей равномерно распределенную нагрузку 40 кН/м. Балка армирована нижней продольной арматурой. Рассмотрены два варианта: вариант 1 – металлическая арматура А400 (четыре стержня диаметром 12 мм); вариант 2 – базальтопластиковая арматура АБП с учетом понижающего коэффициента условий работы для обеспечения деформативности на уровне стальной арматуры [3]. В результате для варианта 2 потребовалось увеличить количество стержней до шести штук того же диаметра. Стоимостные показатели сведены в таблицу 4.

Таблица 4 – Сравнение приведенных затрат за 50 лет эксплуатации в агрессивной среде (руб./балка) [5; 9]

Статья затрат	Металлическая арматура А400	Базальтопластическая арматура (АБП)
Затраты на приобретение и доставку арматуры	4 200	9 800
Затраты на бетонирование и вязку каркасов	2 500	3 700
Первые капитальные затраты (Итого)	6 700	13 500

Текущие ремонты (каждые 12 лет)	18 000	4 000
Затраты на утилизацию	- 1 500	+2 000
Приведенные затраты за 50 лет	23 200	19 500

Из данных таблицы 4 видно, что, несмотря на более чем двукратное превышение начальных затрат, базальтопластиковая арматура обеспечивает снижение суммарных приведенных затрат на 15% за счет отсутствия дорогостоящих ремонтов, вызванных коррозией. В условиях особо агрессивной среды разрыв в пользу композитной арматуры возрастает до 30-40 %, поскольку металлическая арматура требует полной замены конструкций через двадцать лет [9]. При этом в нормальных (неагрессивных) средах металлическая арматура сохраняет преимущество за счет меньших начальных затрат [5].

### **Заключение**

Проведенный сравнительный анализ традиционной металлической и композитной арматуры позволяет сформулировать следующие выводы:

1. Замена металлической арматуры на композитную не может выполняться по принципу равной прочности по кратковременному разрыву ввиду существенного различия модулей упругости и характера деформирования [2; 3; 7]. Для обеспечения равной деформативности и ширины раскрытия трещин с бетоном требуется увеличение сечения композитной арматуры в 1,5-2,5 раза по сравнению со стальной, что нивелирует выигрыш в массе.

2. Критически важным фактором является длительная ползучесть композитной арматуры, которая ограничивает ее расчетное сопротивление уровнем 400-500 МПа, что сопоставимо с характеристиками обычной металлической арматуры А400. Следовательно, рекламируемая производителями высокая прочность (более 1000 МПа) реализуется только при кратковременных нагрузках [7].

3. Техничко-экономический анализ жизненного цикла в агрессивных средах демонстрирует безусловную эффективность композитной арматуры. Несмотря на более высокие начальные капитальные вложения (в 2-3 раза), совокупные затраты на строительство и эксплуатацию за пятидесятилетний период снижаются на 15-30 % за счет ликвидации затрат на антикоррозионную защиту и ремонты [6; 9].

4. Область рационального применения композитной арматуры ограничена конструкциями с высокими требованиями к химической стойкости и отсутствием жестких требований по ограничению ширины раскрытия трещин. В конструкциях, где критична водонепроницаемость и трещиностойкость, предпочтение следует отдавать металлической арматуре или переходить на предварительно напряженные композитные системы, что требует отдельного исследования [2; 3].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 31938-2012. Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2013. – 24 с. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data/780/78025.pdf> (дата обращения: 12.04.2025).
2. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. – М.: Минстрой России, 2018. – 152 с. URL: <https://minstroyrf.gov.ru/docs/18227/> (дата обращения: 15.04.2025).
3. СП 295.1325800.2017. Конструкции бетонные, армированные полимерной композитной арматурой. Правила проектирования. – М.: Стандартинформ, 2017. – 48 с. URL: <https://minstroyrf.gov.ru/docs/15269/> (дата обращения: 15.04.2025).
4. Макушева Н.Ю., Колосова Н.Б. Сравнительный анализ металлической арматуры и арматуры из композитных материалов // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. № 10(25). С. 60-72. DOI: 10.18720/CUBS.25.5

5. Современные методы технико-экономического анализа деятельности в строительстве: учеб. пособие для студ. учреждений сред. проф. образования / сост. Г. М. Загидуллина, А.И. Романова, Л.Ш. Гимадиева. Москва, 2011. 208 с. URL: [https://academia-moscow.ru/ftp\\_share/\\_books/fragments/fragment\\_14666.pdf](https://academia-moscow.ru/ftp_share/_books/fragments/fragment_14666.pdf) (дата обращения: 14.04.2026).
6. Степанова В. Ф., Бучкин А. В., Ильин Д. А. Исследование особенности работы бетонных конструкций с комбинированным армированием (арматурой композитной полимерной и неметаллической фиброй) // Academia. Архитектура и строительство. 2017. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-osobennosti-raboty-betonnyh-konstruktsiy-s-kombinirovannym-armirovaniem-armaturoy-kompozitnoy-polimernoj-i> (дата обращения: 17.04.2026).
7. Фролов, Н. В. Прочность и деформативность изгибаемых железобетонных элементов при длительных силовых и средовых воздействиях: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Белгород, 2020. 24 с. URL: [https://swsu.ru/upload/iblock/094/frolov\\_avtoreferat.pdf](https://swsu.ru/upload/iblock/094/frolov_avtoreferat.pdf) (дата обращения: 14.04.2026).
8. Хорошев А. А., Есина Е. С., С. Е., Нархова В. В. Кононенко Влияние коррозии и методы защиты бетонных и железобетонных конструкций // ИВД. 2025. №3 (123). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-korrozii-i-metody-zaschity-betonnyh-i-zhelezobetonnyh-konstruktsiy> (дата обращения: 13.04.2026).
9. Штебеле О. Э., Хасанов А. А. Особенности применения базальтопластиковой арматуры // Системные технологии. 2019. №4 (33). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-primeneniya-bazaltoplastikovoy-armatury> (дата обращения: 18.04.2026).
10. Бетон для мостовых и тоннельных конструкций, армированный органическими волокнами: пособие для студентов специальности 1-70 03 02 «Мосты, транспортные тоннели и метрополитены» / сост. Г. Д. Ляхевич, В. А. Гречухин, С. Ю. Рожанцев. Минск, 2022. 102 с. URL: <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/109749/Beton.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (дата обращения: 18.04.2026).

© Карпов А.А., 2026.