УДК 72.012

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ УСИЛЕНИЯ ИЗГИБАЕМЫХ ДЕРЕВЯННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ УГЛЕРОДНЫМИ ЛЕНТАМИ И БАЗАЛЬТОПЛАСТИКОВОЙ АРМАТУРОЙ

♦♦♦♦♦

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF REINFORCEMENT OF BENT WOODEN ELEMENTS WITH CARBON STRIPS AND BASALT-PLASTIC REINFORCEMENT

Агарян Карен Оганесович
студент,
Кубанский государственный технологический университет
Karekin509@gmail.com

Фёдоров Данил Андреевич
студент,
Кубанский государственный технологический университет
danil.fedorov.02@list.ru

Аннотация. В статье рассматривается актуальная задача усиления деревянных изгибаемых конструкций с помощью современных композитных материалов. Проведен сравнительный анализ двух ключевых типов армирования: высокомодульных углеродных лент и химически стойкой базальтопластиковой арматуры. Проанализированы их физико-механические свойства (прочность, модуль упругости), экономические показатели и технологические особенности применения, включая методы расчета и риски разрушения по клеевому шву. Установлено, что углеродные ленты обеспечивают максимальное повышение жесткости и наиболее эффективны для снижения прогибов в ответственных конструкциях. Показано, что базальтопластиковая арматура является экономически более выгодным и долговечным решением для массового строительства и эксплуатации в агрессивных средах благодаря своей коррозионной и термической стойкости. В итоге сделан вывод, что выбор армирующего материала не является однозначным и должен основываться на конкретных проектных требованиях, балансируя между необходимой несущей способностью и экономической целесообразностью.

Ключевые слова: усиление деревянных конструкций, углеродное волокно, базальтопластиковая арматура, композитные материалы, изгибаемые элементы, армирование, модуль упругости, деревянная балка.

Agaryan Karen Oganesovich
Student,
Kuban State Technological University
Karekin509@gmail.com

Fedorov Danil Andreevich
Student,
Kuban State Technological University
danil.fedorov.02@list.ru

Annotation. The article discusses the urgent task of strengthening wooden bendable structures using modern composite materials. A comparative analysis of two key types of reinforcement has been carried out: high-modulus carbon tapes and chemically resistant basalt-plastic reinforcement. Their physico-mechanical properties (strength, modulus of elasticity), economic indicators and technological features of their application, including calculation methods and risks of destruction along the adhesive seam, are analyzed. It has been established that carbon belts provide the maximum increase in rigidity and are most effective for reducing deflections in critical structures. It is shown that basalt-plastic reinforcement is an economically more profitable and durable solution for mass construction and operation in aggressive environments due to its corrosion and thermal resistance. As a result, it is concluded that the choice of reinforcing material is not unambiguous and should be based on specific design requirements, balancing between the necessary load-bearing capacity and economic feasibility.

Keywords: reinforcement of wooden structures, carbon fiber, basalt-plastic reinforcement, composite materials, bendable elements, reinforcement, modulus of elasticity, wooden beam.

В строительной отрасли сегодня наблюдается настоящий ренессанс древесины. Это уже не просто традиционный материал, а основа для высокотехнологичных решений, способных конкурировать с бетоном и сталью. Главным драйвером этого процесса стало появление армированных деревянных конструкций (АДК). Внедрение композитов позволяет устранить «врожденные болезни» дерева – пороки строения, анизотропию и ползучесть. Практика показывает, что несущая способность таких элементов возрастает в 2–3,5 раза по сравнению с обычными, что открывает двери для их использования в большепролетных сооружениях и мостостроении [1, с. 1]. Однако перед инженером неизбежно встает дилемма: какой материал выбрать для усиления? На одной чаше весов – технологичные и дорогие углеродные ленты, на

другой – доступная и стойкая базальтопластиковая арматура. В данной работе проведен сравнительный анализ этих материалов с точки зрения механики, экономики и долговечности.

Для начала стоит обратиться к характеристикам «элиты» композитного мира – углеродным волокнам. Эти материалы, получаемые на основе полиакрилонитрила, обладают феноменальной жесткостью. В экспериментах с деревянными мостовыми брусьями, усиленными лентой Carbon Wrap Tape 230/150, было подтверждено, что материал работает как мощный «корсет» для древесины. Модуль упругости углеродных волокон варьируется в широком диапазоне (от 200 до 785 ГПа), но даже при ручном формовании композита реальный показатель составляет около 230–240 ГПа [2, с. 54]. Это на порядок выше, чем у самой древесины (10–14 ГПа).

С другой стороны, базальтопластик, производимый из расплава горных пород, предлагает иной баланс свойств. Хотя по жесткости базальт уступает углю, он существенно превосходит стекловолокно и обладает уникальной химической стойкостью. Для наглядности основные физико-механические характеристики сведены в табл. 1.

Таблица 1 – Сравнительные свойства армирующих волокон

Характеристика	Углеродное волокно	Базальтовое волокно
Модуль упругости, ГПа	200–785	91–110
Прочность на растяжение, МПа	2200–7200	3000–4800
Плотность, г/см³	1,5–1,6	2,6–2,8
Ключевое преимущество	Максимальная жесткость	Химическая стойкость

Такая разница в жесткости играет ключевую роль. Согласно теории составных стержней, чем жестче арматура, тем большую долю нагрузки она забирает на себя, разгружая растянутую зону деревянной балки. Испытания на разрывной машине Instron показали, что предельная прочность углеродной ленты достигает 3810 МПа [2, с. 57]. Использование такого усиления позволяет не просто повысить прочность, но и кардинально изменить характер разрушения конструкции: из хрупкого, по порокам древесины, оно превращается в пластичное. Более того, высокая жесткость углепластика эффективно блокирует развитие деформаций ползучести, что критически важно для длинномерных балок, находящихся под постоянной нагрузкой.

Однако у углерода есть серьезный конкурент – базальтопластик. Этот материал производится из расплава горных пород и обладает уникальным набором свойств. Базальтовые волокна имеют плотность 2,6–2,8 г/см³ и прочность на разрыв 3000–4800 МПа, что сопоставимо с углеродом. Однако модуль упругости у них ниже – в пределах 91–110 ГПа [3, с. 30]. Казалось бы, проигрыш в жесткости очевиден. Но базальтопластиковая арматура берет свое в других аспектах.

Во-первых, это химическая стойкость. Деревянные конструкции часто применяются в агрессивных средах (склады удобрений, химические цеха, прибрежные зоны). Углеродные материалы, несмотря на инертность самого волокна, могут страдать от деградации полимерной матрицы, а стекловолокно боится щелочной среды бетона (если речь идет о комбинированных системах). Базальт же абсолютно равнодушен к солям, кислотам и щелочам, не подвержен электрохимической коррозии и не впитывает влагу [3, с. 33]. Это делает его идеальным кандидатом для внешнего армирования конструкций, контактирующих с внешней средой.

Во-вторых, экономика и температурная стабильность. Стоимость базальтового волокна существенно ниже углеродного, а его температурный диапазон эксплуатации впечатляет: материал выдерживает нагрев до 700–900 °С [3, с. 30], тогда как углепластики ограничены термостойкостью эпоксидного связующего. В случае пожара базальтовая сетка или стержень дольше сохранят целостность сечения, удерживая обугленную древесину от обрушения.

Важнейшим аспектом проектирования усиления является расчетная схема. Просто наклеить ленту недостаточно – необходимо обеспечить совместную работу материалов. Здесь вступает в силу методика расчета приведенного момента инерции се-

чения (lпр). Формулы демонстрируют, что эффективность включения арматуры в работу (βw) напрямую зависит от коэффициента армирования и соотношения модулей упругости [4, с. 132]. Для углеродного волокна этот коэффициент выше, что позволяет использовать меньшее количество материала для достижения того же эффекта.

Однако, учитывая высокую стоимость углерода, инженеры прибегают к хитрости – переменному армированию. Эпюра изгибающих моментов в балке неравномерна: максимум находится в центре пролета, а на опорах он равен нулю. Логично, что и армирование должно следовать этому закону. Расчеты нормальных напряжений (σ) и касательных напряжений (т) показывают, что плавное уменьшение сечения арматуры от середины к краям позволяет сэкономить материал без потери несущей способности. Но здесь кроется опасность: в месте обрыва или изменения сечения арматуры возникают пиковые касательные напряжения в клеевом шве, которые могут привести к скалыванию [4, с. 133]. Для углеродных лент с их высокой жесткостью этот риск выше, чем для более податливого базальта.

Нельзя обойти вниманием и альтернативные материалы, такие как стеклопластик или сравнительно новый на рынке продукт – арматура из вторичного полиэтилентерефталата (АСПЭТ). Анализ показывает, что АСПЭТ, хотя и обладает низким модулем упругости (27–47 ГПа) и прочностью (около 510 МПа), имеет право на жизнь в малонагруженных элементах благодаря своей дешевизне и экологичности [5, с. 50]. Но для серьезных изгибаемых элементов, где важна жесткость, он проигрывает и углю, и базальту. Углепластик, имея модуль упругости до 785 ГПа (в идеальных условиях), остается вне конкуренции для задач, где нужно минимизировать прогибы [5, с. 48].

Технологичность монтажа также вносит вклад в итоговую эффективность. Углеродные ленты требуют тщательной подготовки поверхности, грунтования и пропитки связующим (обычно эпоксидным). Это трудоемкий процесс, требующий высокой квалификации персонала. Ошибка в пропорциях смолы или нарушение температурного режима может свести на нет все преимущества дорогого волокна. Базальтопластиковая арматура часто поставляется в виде готовых стержней, которые можно вклеивать в пазы. Этот метод, известный как «near-surface mounted reinforcement», защищает арматуру слоем древесины и клея, повышая огнестойкость и вандалоустойчивость. Кроме того, базальтовые трубы и профили в 4,3 раза легче стальных, что упрощает логистику и монтаж без тяжелой техники [3, с. 33]. Однако именно роль железобетонных конструкций является основополагающей в обеспечении устойчивости и безопасности высотных зданий в городской среде. Их монолитное ядро и каркас эффективно противостоят ветровым и сейсмическим нагрузкам, гарантируя надежность самых амбициозных архитектурных проектов [6, с. 988].

Анализируя опыт применения АДК, стоит отметить положительное влияние армирования на эксплуатационные характеристики. Внедрение композитов позволяет снизить монтажный вес конструкций на 15–20% и сократить расход самой древесины на 35–45 % [1, с. 2]. Это не только прямая экономия, но и снижение нагрузки на фундаменты. В условиях длительной эксплуатации армирование берет на себя роль «стабилизатора», компенсируя реологические свойства древесины. Особенно это заметно при использовании углеродных лент, которые практически не ползут под нагрузкой.

В итоге, выбор между углеродом и базальтом – это выбор между максимальной эффективностью и рациональной достаточностью. Углеродные ленты незаменимы при реконструкции памятников архитектуры, увеличении несущей способности мостов и перекрытий, где нельзя менять габариты сечения. Их высокая цена окупается надежностью и минимальным весом. Базальтопластик же – «рабочая лошадка» для массового строительства, сельскохозяйственных объектов и сооружений в агрессивных средах. Его применение позволяет получить долговечную конструкцию за разумные деньги. Грамотное комбинирование этих материалов, использование методик переменного армирования и точный расчет напряжений в клеевых швах позволяют создавать деревянные конструкции нового поколения, отвечающие самым строгим требованиям современности.

Литература

1. Лобов Д.М. Особенности армирования деревянных элементов, усиленных углеродным волокном, при статическом изгибе / Д.М. Лобов, А.В. Крицин, А.В. Тихонов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2013. – № 2(24). – С. 132–138. EDN QITLCN
2. Пономарев В.Б. Базальтовые и базальтопластиковые материалы для строительства / В.Б. Пономарев, А.Ц. Рапопорт // Базальтовые технологии. – 2012. – № 1. – С. 29–35. EDN RCASVB
3. Гиль А.И. Стеклопластиковая и углепластиковая арматура в строительстве: преимущества, недостатки, перспективы применения / А.И. Гиль, Е.Н. Бадалова, Е.Д. Лазовский // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. – 2015. – № 16. – С. 48–53. EDN VURVNH
4. Окольникова Г.Э. Перспективы использования композитной арматуры в строительстве / Г.Э. Окольникова, С.В. Герасимов // Экология и строительство. – 2015. – № 3. – С. 14–21. EDN VJSOVB
5. Экспериментальное и рассчётное исследование ленты из углеродного волокна для внешнего армирования деревянных мостовых брусьев / Ф. Ф. Хошимова [и др.] // Химия, физика и механика материалов. – 2022. – № 1(32). – С. 91–103. EDN NAZWKZ
6. Гринев Д.Д. Роль железобетонных конструкций в обеспечении устойчивости и безопасности высотных зданий в городской среде // Студенческая научно-исследовательская лаборатория: современное состояние и перспективы: Сборник научных статей III Международной студенческой междисциплинарной научно-практической конференции, Краснодар, 17–18 декабря 2024 года. – Краснодар : Академия маркетинга и социально-информационных технологий – ИМСИТ, 2024. – С. 986–991. EDN VOXOTU
7. Савин Н.С. Особенности применения лент из углеродных волокон для увеличения несущей способности конструкций / Н.С. Савин, А.Н. Леонова // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2025. – № 2. – С. 158–161.
8. Леонова А.Н. Усиление деревянных конструкций композитными материалами / А.Н. Леонова, Х.Э. Акритов // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2020. – № 2. – С. 329–333.

References

1. Lobov D.M. Features of Reinforcement of Wooden Elements Reinforced with Carbon Fiber under Static Bending / D.M. Lobov, A.V. Kritsin, A.V. Tikhonov // Bulletin of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. – 2013. – № 2(24). – P. 132–138. EDN QITLCN
2. Ponomarev V.B. Basalt and Basalt-Plastic Materials for Construction / V.B. Ponomarev, A.Ts. Rapoport // Basalt Technologies. – 2012. –№ 1. – P. 29–35. EDN RCASVB
3. Gil A.I. Fiberglass and Carbon Fiber Reinforced Plastic Reinforcement in Construction: Advantages, Disadvantages, and Application Prospects / A.I. Gil, E.N. Badalova, E.D. Lazovsky // Bulletin of Polotsk State University. Series F. Construction. Applied Sciences. – 2015. – № 16. – P. 48–53. EDN VURVNH
4. Okolnikova G.E. Prospects for the Use of Composite Reinforcement in Construction / G.E. Okolnikova, S.V. Gerasimov // Ecology and Construction. – 2015. – № 3. – P. 14–21. EDN VJSOVB.
5. Experimental and computational study of carbon fiber tape for external reinforcement of wooden bridge beams / F.F. Khoshimova [et al.] // Chemistry, Physics and Mechanics of Materials. – 2022. – № 1(32). – P. 91–103. EDN NAZWKZ
6. Grinev D.D. The role of reinforced concrete structures in ensuring the stability and safety of high-rise buildings in the urban environment // Student research laboratory: current state and prospects: collection of scientific articles of the III International Student Interdisciplinary Scientific and Practical Conference, Krasnodar, December 17–18, 2024. – Krasnodar : Academy of Marketing and Social and Information Technologies – IMSIT, 2024. – P. 986–991. EDN VOXOTU
7. Savin N.S. Features of the use of carbon fiber tapes to increase the load-bearing capacity of structures / N.S. Savin, A.N. Leonova // Science. Engineering. Technologies (Polytechnical Bulletin). – 2025. – № 2. – P. 158–161.
8. Leonova A.N. Strengthening wooden structures with composite materials / A.N. Leonova, Kh.E. Akritov // Science. Engineering. Technologies (Polytechnical Bulletin). – 2020. – № 2. – P. 329–333.