

УДК 33

DOI: 10.34670/AR.2022.64.58.029

Экономические аспекты исследования напряженно-деформированного состояния балок деревянного перекрытия, усиленных углеволокном исторического здания

Курбатова Юлия Андреевна

Магистрант,
Национальный исследовательский университет
«Московский государственный строительный университет»,
41006, Российская Федерация, Мытищи, просп. Олимпийский, 50;
e-mail: kurbatovajuliapb@mail.ru

Аннотация

Согласно единой межведомственной информационно-статистической системе (ЕМИСС) и данным Министерства культуры РФ, с 2014 года по 2020 год произошел прирост количества объектов культурного наследия регионального значения (+14,2%) и муниципального значения (+62,8%), при этом количество объектов культурного наследия федерального значения снизилось на 24%. Как показывает статистика, большинство объектов культурного наследия нуждаются в реконструкции, реставрации или ремонте, многие объекты находятся в аварийном состоянии. Это, в свою очередь, подтверждает необходимость замены или усиления конструкций здания. Но, к сожалению, реконструкция здания, замена конструкций и другие работы имеют высокую стоимость, требуют больших затрат времени и труда, поэтому разумно было бы предложить альтернативный вариант, например усиление конструкций.

Для цитирования в научных исследованиях

Курбатова Ю.А. Экономические аспекты исследования напряженно-деформированного состояния балок деревянного перекрытия, усиленных углеволокном исторического здания // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2022. Том 12. № 6А. С. 243-251. DOI: 10.34670/AR.2022.64.58.029

Ключевые слова

Напряженно-деформированное состояние, балки деревянного перекрытия, углеволокно, историческое здание, объект культурного наследия, материал, конструкция.

Введение

В качестве материала для усиления все чаще выбирают полимерные композитные материалы, например углеволокно, поскольку прочностные характеристики выше, чем у стали, имеется малый удельный вес, высокая адгезия к конструкции и другие положительные качества. Главный недостаток – это высокая стоимость углеволокна.

На рынке появляется все больше производителей углеродных ламелей, лент, сеток, но применяемые схемы усиления остаются довольно примитивными, например, когда усиление конструкции рассматривается продольно по нижней грани. Но действительно ли этот способ наиболее эффективный? Можно ли сделать его экономичнее, рассмотрев другие схемы усиления? Что будет выгоднее: замена конструкции или усиление углеволокном? Эти и другие вопросы показывают, что усиление углеволокном – это интересная и актуальная задача, которую стоит рассмотреть. К тому же, отсутствие нормативной базы и достаточного количества исследований по данной тематике подтверждает, что выбранную тему можно считать актуальной.

Объектом исследования является деревянная балка перекрытия, усиленная углеволокном. Предмет исследования – напряженно-деформированное состояние усиленной балки перекрытия. Цель работы отражается в исследовании напряженно-деформированного состояния балок деревянного перекрытия, усиленных углеволокном, и в предложении наиболее эффективного и экономичного усиления деревянных изгибаемых элементов.

Основная часть

Отвечающими за жесткость, прочность и надежность деревянного перекрытия являются балки. Но в силу определенных свойств древесины эксплуатационный срок деревянной балки ограничен, в частности, если балка была плохо обработана или подвергалась нагрузке и воздействию влаги.

Потребность в усилении деревянных балок при реконструкции возникает в результате выполнения следующих условий: увеличение полезных нагрузок; изменение назначения сооружения; аварийное состояние конструкции.

Нарушение температурно-влажностного режима, отсутствие контроля, наличие вредителей и другие нарушения нормальной эксплуатации деревянных конструктивных элементов являются частыми причинами замен балок перекрытия, поскольку данные факторы приводят к повреждению или разрушению конструкции.

Вне зависимости от причин, из-за которых произошло повреждение или разрушение балки, уменьшение или потеря несущей способности, необходимо обеспечить эксплуатационную надежность деревянных конструкций. Одним из способов повышения несущей способности конструкции является ее усиление различными материалами.

Преимуществ использования углеволокна множество: высокие прочностные характеристики, необходимые для усиления конструкций, несмотря на малую плотность ($1,7-1,95 \text{ г/см}^3$) и толщину (до 5 мм) – углепластики превосходят металлы по прочности в 2-4 раза; высокая стойкость к коррозии, воде и химическим веществам, что позволяет применять углеволокно в химически агрессивных средах (склады, бассейны, аквапарки); минимальные требования к пространству для проведения работ, что немаловажно при реконструкции и ограниченном доступе к конструкции; высокая адгезия к усиливаемой конструкции; снижение

расходов, временных и трудовых затрат, а также простой монтаж [Кузина, 2016; Полякова, 2019; Добрышкин, 2021; Топчий, Сафенков, 2018].

Усиление конструктивных элементов углеволокнистыми материалами может применяться при проведении строительных работ с целью повышения прочности, надежности и долговечности конструкций, а также для восстановления поврежденных элементов в результате нарушений эксплуатации конструкций.

Материалы на основе углеволокна используются для усиления изгибаемых конструкций в растянутой зоне (балок, ригелей, плит перекрытий), на приопорных участках в местах действия поперечных сил, а также для усиления сжатых элементов (колонн, пилонов).

В работе рассмотрен объект культурного наследия федерального значения «Усадьба Останкино, конец XIII в. – Дворец-театр, 1792-1798 гг.», расположенный по адресу: г. Москва, ул. Останкинская, д. 6, стр. 1.

Архитекторами, трудившимися над разработкой проекта Дворца, являлись Ф. Кампорези, Д. Кваренги, В.И. Баженов, Е.С. Назаров и др.

Останкинский дворец является единственным в нашей стране и одним из немногих в Европе театральным зданием конца XVIII века, в котором сохранились залы фойе, театральный зал и даже машинное отделение с машинерией. Музей является обладателем ценнейших коллекций; кроме вещей, находящихся в интерьерах дворца, музей обладает богатыми фондами.

Научно-реставрационные работы здания дворца-театра были начаты в 1935–

1941 гг., продолжались в 1957 г., также в 1974–1984 гг. осуществлялась комплексная реставрация. В 1989–2002 гг. восстанавливались интерьеры, а в 2014–2016 гг. в рамках работ по сохранению объекта культурного наследия были выполнены комплексные научные исследования, на основании которых разработан проект реставрации и приспособления.

За время своего существования со времени строительства в 1792–1799 гг. здание дворца-театра имения Останкино претерпело множественные переделки, достройки, ремонты разной степени капитальности, а также реставрации.

На данный момент состояние здания оценивается как ограниченно работоспособное. На основании отчета об инженерно-техническом обследовании было рекомендовано произвести частичную и полную замену балок деревянного перекрытия. В данной работе предложена альтернатива замене деревянных конструкций междуэтажного перекрытия – усиление деревянных балок углеволокном.

В исследовании рассматривается деревянная балка междуэтажного перекрытия из древесины хвойных пород 2-го сорта с сечением 300х400 мм и длиной 6520 мм.

В случае моделирования, расчета и анализа работы конструкции в программно-вычислительных комплексах можно избежать дорогостоящих испытаний, что оптимизирует работу с усилением деревянных конструкций.

Моделирование деревянной балки с усилением углеволокном и прочностной расчет производились в «ANSYS Workbench», что позволяет корректно рассмотреть совместную работу древесины и углеволокна.

Перед проведением расчета в ПК «ANSYS» были собраны нагрузки на междуэтажное перекрытие объекта согласно проекту, коэффициенты надежности по нагрузке и значение полезной нагрузки взяты в соответствии с СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия». Далее в программно-вычислительном комплексе «ANSYS» задаются параметры равномерно-распределенной нагрузки ($q_{\text{норм}} = 72,258 \text{ кН}$, $q_{\text{расч}} = 86,651 \text{ кН}$) и производится расчет для дальнейшего анализа эффективности усиления.

Результаты расчетов в ПК «ANSYS» показаны в таблице 1.

Таблица 1 – Сводная таблица результатов

Схема усиления	Максимальные нормальные напряжения, МПа	Максимальные касательные напряжения, МПа	Максимальные абсолютные деформации, мм
Балка без усиления	5,98	0,52	9,93
Схема № 1	4,99	0,49	8,85
Схема № 2	5,46	0,52	9,24
Схема № 3	5,99	0,52	9,79
Схема № 4	4,99	0,52	9,09
Схема № 5	4,99	0,49	8,73
Схема № 6	5,98	0,42	9,81
Схема № 7	5,46	0,42	9,13
Схема № 8	4,99	0,39	8,73
Схема № 9	4,99	0,42	8,85
Схема № 10	4,99	0,39	8,49

Из анализа результатов стоит заметить, что усиление деревянных конструкций снижает не только их деформативность, но и значения нормальных и касательных напряжений. При использовании углеродных ламелей для усиления деревянной балки максимальные нормальные напряжения снизились до 16,56%, а максимальные касательные напряжения – до 25%.

На диаграмме (рис. 1) отображен процент уменьшения прогиба при различных схемах усиления ламелями из углеволокна относительно прогиба исходной балки.

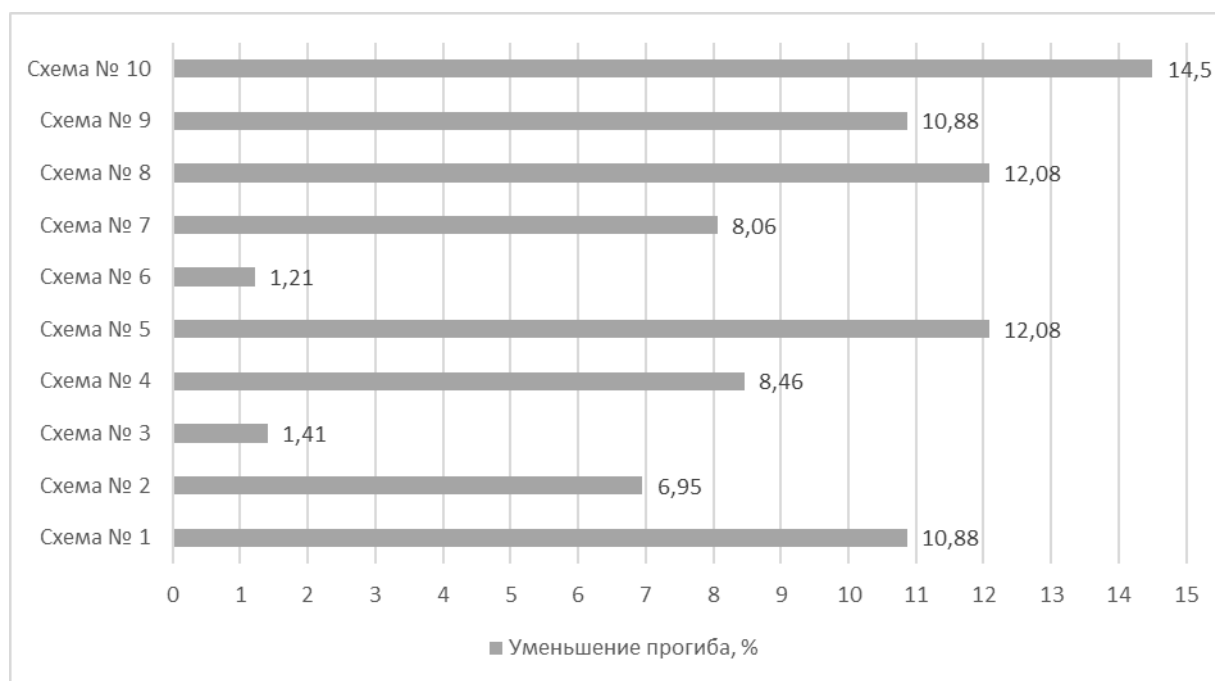


Рисунок 1 – Процент уменьшения прогиба при различных схемах усиления ламелями из углеволокна относительно прогиба исходной балки

Схемы усиления, при которых уменьшение прогиба составило менее 5%, принимаем неудачными, следовательно, схему № 3 (усиление углеродными ламелями шириной 200 мм по

боковым поверхностям под углом 30°) и схему № 6 (усиление углеродными ламелями по боковым поверхностям в районе опор на ширину 500 мм от края балки) в дальнейшем не рассматриваем. Неудовлетворительные результаты связаны с отсутствием углеродной ламели на нижней грани балки.

Схемы усиления № 1, 5, 8 и 10 предусматривают расположение ламелей углеволокна по всей длине нижней грани, а схемы усиления № 2, 4, 7 и 9 – на $1/3$ длины нижней грани. Для определения зависимости эффективности усиления углеволокном от длины размещения углеволокна на нижней грани балки сравним увеличение жесткости при следующих схемах усиления: схемы усиления № 1 и 2: $10,88-6,95=3,93\%$; схемы усиления № 4 и 5: $12,08-8,46=3,62\%$; схемы усиления № 7 и 8: $12,08-8,06=4,02\%$; схемы усиления № 9 и 10: $14,50-10,88=3,62\%$

Можно сделать вывод, что для оптимизации затрат возможно установить углеродную ламель на $1/3$ длины нижней грани, что снизит эффективность усиления лишь незначительно.

Необходимо учитывать, что продольное армирование (схемы № 1 и 2) не влияет на прочность древесины на скалывание, и с увеличением нагрузки на балку касательные напряжения будут возрастать, что приведет к хрупкому разрушению конструкции от скалывания вдоль волокон.

В связи с этим для минимизации негативных последствий рекомендуется предусматривать наклонное армирование. Но как показали расчеты, эффективнее использовать ламели на приопорных зонах (схемы № 7 и 8), в этом случае максимальные касательные напряжения уменьшаются на $19,23-25\%$, а в использовании наклонных ламелей (схемы № 4 и 5) – до $5,77\%$.

Схемы № 9 и 10 имеют в своем составе и наклонные ламели и ламели на приопорных зонах, что является неразумной тратой ресурсов, поскольку значительного прироста несущей способности и жесткости данные схемы не показали.

В результате проведенных расчетов и сравнительного анализа рассмотренных схем усиления наилучшие показатели увеличения прочности и жесткости имеет схема усиления № 8 (усиление углеродными ламелями по всей длине нижней грани и по боковым поверхностям в районе опор на ширину 500 мм от края балки). Впоследствии данная схема будет учтена в сравнительном анализе экономической эффективности усиления углеволокном деревянных балок перекрытия.

Для выполнения расчетов была принята система внешнего армирования FibArm, а именно углеродная ламель FibArm Lamel 14/100, которая представляется собой пропитанные и полимеризованные в заводских условиях углеродные нити, ставшие композитной пластиной, и предназначена для увеличения несущей способности и усиления бетонных, железобетонных, каменных, стальных и деревянных конструкций.

Опишем способ применения FibArm Lamel 14/100.

Поверхность, на которую будут крепиться ламели, должна быть чистой, сухой, ошлифованной и обеспыленной. Далее необходимо разложить и подготовить углеродные ламели, в случае загрязнений ламелей их нужно очистить растворителем и просушить в течение 30 минут. Затем необходимо подготовить клеевой эпоксидный состав, нанести его на поверхность конструкции толщиной слоя не менее 1 мм и на ламели толщиной слоя не менее 1,5 мм. Далее производится укладка ламелей на поверхность конструкции и приткатка ламелей для удаления излишков клеевого состава.

Для использования ламелей из углеволокна FibArm Lamel 14/100 необходимо приобрести двухкомпонентный эпоксидный клей для систем внешнего армирования FibArm Resin Laminate.

Клей состоит из двух компонентов: компонент «А» представляет собой тиксотропную смесь эпоксидных смол, активных разбавителей, наполнителей, пигментов и целевых добавок, компонент «Б» является полиаминным отвердителем, содержащим наполнитель и специальные добавки. Упаковка предполагает два металлических ведра, в каждом ведре отдельный компонент. Производитель предлагает комплекты 15 кг, 30 кг и 45 кг.

Способ применения FibArm Resin Laminate выглядит следующим образом.

Предварительно необходимо смешать составы в соотношении 100/25 по весу. Затем мешалкой с низкими оборотами (300-400 об/мин) составы должны перемешиваться три минуты, чтобы смесь получила однородный светло-серый цвет. Далее необходимо предусмотреть перемешивание на более низких оборотах в течение одной минуты. После этого можно использовать клей с помощью шпателя.

Стоимость рулона FibArm Lamel 14/100 составляет 452700 рублей, т.е. 4527 рублей за погонный метр.

Стоимость комплекта 15 кг FibArm Resin Laminate составляет 40875 рублей, т.е. 2725 рублей за килограмм смеси.

Далее рассчитаем стоимость ламелей из углеволокна с учетом расхода эпоксидного клея согласно рассмотренным ранее схемам усиления (табл. 2).

Таблица 2 – Стоимость ламелей из углеволокна и эпоксидного клея

Наименование схемы усиления	Необходимое количество ламелей	Стоимость ламелей	Необходимое количество эпоксидного клея	Стоимость эпоксидного клея	Итоговая стоимость усиления
Схема № 1	3 ламели по 6520 мм, т.е. 19,56 м	88548 руб	$S_{\text{усиления}}=1,956 \text{ м}^2$, тогда $m_{\text{клея}}=9 \text{ кг}$	24525 руб	113073 руб
Схема № 2	3 ламели по 2180 мм, т.е. 6,54 м	29606 руб	$S_{\text{усиления}}=0,654 \text{ м}^2$, тогда $m_{\text{клея}}=3 \text{ кг}$	8175 руб	37781 руб
Схема № 4	3 ламели по 2180 мм и 8 ламелей по 800 мм, т.е. 12,94 м	58579 руб	$S_{\text{усиления}}=0,974 \text{ м}^2$, тогда $m_{\text{клея}}=4,5 \text{ кг}$	12262 руб	70841 руб
Схема № 5	3 ламели по 6520 мм и 8 ламелей по 800 мм, т.е. 25,96 м	117520 руб	$S_{\text{усиления}}=2,276 \text{ м}^2$, тогда $m_{\text{клея}}=10,5 \text{ кг}$	28612 руб	146132 руб
Схема № 7	3 ламели по 2180 мм и 20 ламелей по 400 мм, т.е. 14,54 м	65822 руб	$S_{\text{усиления}}=1,454 \text{ м}^2$, тогда $m_{\text{клея}}=6,7 \text{ кг}$	18257 руб	84079 руб
Схема № 8	3 ламели по 6520 мм и 20 ламелей по 400 мм, т.е. 27,56 м	124764 руб	$S_{\text{усиления}}=2,756 \text{ м}^2$, тогда $m_{\text{клея}}=12,7 \text{ кг}$	34607 руб	159371 руб
Схема № 9	3 ламели по 2180 мм, 8 ламелей по 800 мм и 20 ламелей по 400 мм, т.е. 20,94 м	94795 руб	$S_{\text{усиления}}=1,774 \text{ м}^2$, тогда $m_{\text{клея}}=8,2 \text{ кг}$	22345 руб	117140 руб
Схема № 10	3 ламели по 6520 мм, 8 ламелей по 800 мм и 20 ламелей по 400 мм, т.е. 33,96 м	153736 руб	$S_{\text{усиления}}=3,076 \text{ м}^2$, тогда $m_{\text{клея}}=14,2 \text{ кг}$	38695 руб	192431 руб

Исходя из примеров применения материалов на основе углеволокна можно сделать вывод, что в большинстве случаев существует возможность оптимизировать бюджет за счет использования углеволокна при усилении конструкций. Рассмотрим данную гипотезу на примере сравнения затрат на замену деревянной балки перекрытия и на ее усиление углеродными ламелями.

После изучения технологии замены деревянной балки перекрытия и технологии усиления деревянной балки перекрытия углеволокном был проведен расчет денежных и временных затрат на основные виды работ.

Результаты расчетов денежных и временных затрат показаны в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты расчетов затрат на проведение работ

	Усиление конструкции углеволокном	Замена конструкции
Денежные затраты	298287,96 руб.	538665,05 руб.
Временные затраты	92,15 чел.-час	240,94 чел.-час

Согласно результатам, усиление деревянной балки перекрытия с использованием углеволокна вместо замены балки перекрытия позволяет снизить временные затраты на 62%, а денежные – на 55%.

Заключение

Таким образом, Нарушение температурно-влажностного режима, отсутствие контроля, наличие вредителей и другие нарушения нормальной эксплуатации деревянных конструктивных элементов являются частыми причинами замен балок перекрытия, поскольку данные факторы приводят к повреждению или разрушению конструкции. Усиление деревянных изгибаемых конструкций углеродными материалами не только значительно повысит прочность и жесткость конструкции, но и позволит оптимизировать бюджет и сократить время на проведение работ.

Библиография

1. Добрышкин А.Ю. Положительные качества композитных материалов с применением углеволокна // Дмитриев Э.А., Космынин А.В. (ред.) Материалы IV Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований». Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2021. С. 33-34.
2. Кузина Е.С. Метод усиления несущих конструкций зданий и сооружений углеволокном // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения. 2016. № 1. С. 165-170.
3. Линьков И.М. Армированные клееные деревянные конструкции // МОД, реф. информация ЦНИИТЭ Леспрома. 1987. № 4. С. 15-21.
4. Окунь И.В. Прочность и деформативность клеодоштых балочных конструкций с послойным армированием: дис. ... канд. техн. наук. Одесса, 2014. 193 с.
5. Полякова Н.А. Применение углеволокна для усиления зданий культурного наследия // Молодой ученый. 2019. № 22(260). С. 188-190.
6. Рощина С.И. Армированные деревянные конструкции // Архитектура и строительство России. 2008. С. 34-39.
7. Топчий Д.В., Сафенков Е.В. Зарубежный и отечественный опыт усиления железобетонных конструкций углепластиком // Инновации и инвестиции. 2018. № 7. С. 187-192.
8. Borri A., Corradi M., Grazini A. A method for flexural reinforcement of old wood beams with CFRP materials // J. Composites part B engineering. 2005. No. 36/2. P. 143-153.
9. CNR-DT 201 Guidelines for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing

- Structures. Timber structures, Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction. Italy, 2005. 58 p.
10. Corradi M., Righetti L., Borri A. Bond Strength of Composite CFRP Reinforcing Bars in Timber. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5455648>.

Economic aspects of the study of the stress-strain state of wooden floor beams, reinforced with carbon fiber of historic building

Yuliya A. Kurbatova

Master Student,
National Research University
"Moscow State Construction University",
41006, 50 Olimpiiskii ave., Mytishchi, Russian Federation;
e-mail: kurbatovajuliapb@mail.ru

Abstract

According to the unified interdepartmental information and statistical system (EMISS) and the data of the Ministry of Culture of the Russian Federation, from 2014 to 2020 there was an increase in the number of cultural heritage objects of regional significance (+14.2%) and municipal significance (+62.8%), while the number of objects of cultural heritage of federal significance decreased by 24%. As statistics show, most cultural heritage sites need reconstruction, restoration or repair, and many sites are in disrepair. This, in turn, confirms the need to replace or strengthen the building structures. But, unfortunately, the reconstruction of the building, the replacement of structures and other works are expensive, require a lot of time and labor, so it would be reasonable to offer an alternative, such as strengthening the structures.

For citation

Kurbatova Yu.A. (2022) Ekonomicheskie aspekty issledovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya balok derevyannogo perekrytiya, usilennykh uglevoloknom istoricheskogo zdaniya [Economic aspects of the study of the stress-strain state of wooden floor beams, reinforced with carbon fiber of historic building]. *Ekonomika: vchera, segodnya, zavtra* [Economics: Yesterday, Today and Tomorrow], 12 (6A), pp. 243-251. DOI: 10.34670/AR.2022.64.58.029

Keywords

Stress-strain state, wooden floor beams, carbon fiber, historical building, cultural heritage site, material, construction.

References

1. Borri A., Corradi M., Grazini A. (2005) A method for flexural reinforcement of old wood beams with CFRP materials. *J. Composites part B engineering*, 36/2, pp. 143-153.
2. CNR-DT 201 Guidelines for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures. Timber structures, Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction (2005). Italy.
3. Corradi M., Righetti L., Borri A. *Bond Strength of Composite CFRP Reinforcing Bars in Timber*. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5455648> [Accessed 14/06/2022].
4. Dobryshkin A.Yu. (2021) Polozhitel'nye kachestva kompozitnykh materialov s primeneniem uglevolokna [Positive

- qualities of composite materials using carbon fiber]. In: Dmitriev E.A., Kosmynin A.V. (eds.) *Materialy IV Vserossiiskoi natsional'noi nauchnoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh "Molodezh' i nauka: aktual'nye problemy fundamental'nykh i prikladnykh issledovaniy"* [Proc. All-Russian Conf. of Students, Postgraduates and Young Scientists "Youth and Science: Actual Problems of Fundamental and Applied Research"]. Komsomol'sk-na-Amure: Komsomolsk-on-Amur State University, pp. 33-34.
5. Kuzina E.S. (2016) Metod usileniya nesushchikh konstruktssii zdanii i sooruzhenii uglevoloknom [The method of strengthening the load-bearing structures of buildings and structures with carbon fiber]. *Bezopasnost' stroitel'nogo fonda Rossii. Problemy i resheniya* [Safety of the construction fund of Russia. Problems and solutions], 1, pp. 165-170.
6. Lin'kov I.M. (1987) Armirovannye kleenye derevyannye konstruktssii [Reinforced glued wooden structures]. *MOD, ref. informatsiya TsNIITE Lesproma* [MOD, ref. Information of Lesprom], 4, pp. 15-21.
7. Okun' I.V. (2014) *Prochnost' i deformativnost' kleedoshchatykh balochnykh konstruktssii s posloinym armirovaniem. Dokt. Diss.* [Strength and deformability of glued beam structures with layered reinforcement. Doct. Diss.]. Odessa.
8. Polyakova N.A. (2019) Primenenie uglevolokna dlya usileniya zdanii kul'turnogo naslediya [The use of carbon fiber to strengthen buildings of cultural heritage]. *Molodoi uchenyi* [Young scientist], 22(260), pp. 188-190.
9. Roshchina S.I. (2008) Armirovannye derevyannye konstruktssii [Reinforced wooden structures]. *Arkhitektura i stroitel'stvo Rossii* [Architecture and construction of Russia], pp. 34-39.
10. Topchii D.V., Safenkov E.V. (2018) Zarubezhnyi i otechestvennyi opyt usileniya zhelezobetonnykh konstruktssii ugleplastikom [Foreign and domestic experience of strengthening reinforced concrete structures with carbon fiber]. *Innovatsii i investitsii* [Innovations and investments], 7, pp. 187-192.