

ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ ОТРАБОТАННЫХ ЛЕНТОЧНЫХ ПИЛ НА АДГЕЗИВНУЮ ПРОЧНОСТЬ КЛЕЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ С ДРЕВЕСИНОЙ

Д. О. Мясников^{1*}, М. С. Лисятников², С.И. Рощина³

¹аспирант кафедры строительных конструкций, ВлГУ, 600000, г. Владимир, ул. Горького, 87, (daniil.miasnikov.96@mail.ru 89607220500)

² к.т.н., доцент кафедры СК ВлГУ, 600000, г. Владимир, ул. Горького, 87, (mlisyatnikov@mail.ru, 8-904-035-83-35)

³ зав. каф. СК ВлГУ, д.т.н., профессор, 600000, г. Владимир, ул. Горького, 87, (rsi3@mail.ru, (4922) 479-804)

Аннотация

Предмет исследования: в связи с высокими объемами производства пиломатериалов в Российской Федерации возникает проблема по утилизации отработанных полотен ленточных пил (ОПЛП), срок службы которых составляет 20–500 часов. Одним из перспективных направлений решения данной проблемы является использование ОПЛП в качестве материала для армирования деревянных строительных конструкций, что способствует как решению экологических проблем, так и снижению стоимости строительных конструкций.

Цели: целью исследования является определение влияния различных методов поверхностной обработки ОПЛП на адгезивную прочность клеевых соединений с древесиной для оптимизации технологии армирования деревянных балок.

Материалы и методы: исследование проводилось с использованием образцов древесины сосны сечением 50×50 мм, в которые клеивались ОПЛП, обработанные тремя различными способами: снятие гальванического слоя (царапины), нанесение вертикальных насечек с шагом 20 мм, нанесение крестообразных насечек с шагом 200 мм. Испытания выполнялись на разрывной машине РЭМ-100 при скорости нагружения 5 мм/мин. Общий объем испытаний составил 15 образцов (по 5 образцов для каждого типа обработки).

Результаты: результаты испытаний показали, что образцы с ОПЛП, обработанными методом снятия гальванического слоя, демонстрируют наибольшую адгезивную прочность (среднее значение 11,28 кН) с разрушением по древесине. Образцы с крестообразными насечками показали прочность 9,93 кН с разрушением по металлу, а образцы с продольными насечками – 8,94 кН с разрушением по металлу. Коэффициенты вариации для всех типов обработки не превышали 6,5%, что свидетельствует о достаточной однородности результатов.

Выводы: наиболее эффективным способом поверхностной обработки ОПЛП для обеспечения высокой адгезивной прочности является снятие гальванического слоя. Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологии производства армированных деревянных конструкций с применением вторичных материалов, что способствует решению проблем утилизации отходов деревообрабатывающей промышленности и снижению стоимости строительных конструкций.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях интенсивного развития строительной индустрии в Российской Федерации особую актуальность приобретают вопросы рационального использования природных ресурсов и экологически безопасной утилизации промышленных отходов [1, С. 29]. Деревообрабатывающая промышленность является одним из крупнейших потребителей металлорежущего инструмента, в том числе ленточных пил, ресурс которых ограничен и составляет от 20 до 500 часов в зависимости от условий эксплуатации [2, С. 44].

Накопление отработанных полотен ленточных пил (ОПЛП) создает серьезную экологическую проблему, поскольку данные отходы содержат легированные стали и твердые сплавы, а также остатки древесных материалов, что затрудняет их переработку и утилизацию традиционными методами [3, С. 107].

Использование ОПЛП в качестве армирующих элементов для деревянных конструкций представляется перспективным направлением, позволяющим решить одновременно несколько задач: утилизацию промышленных отходов, снижение стоимости строительных материалов за счет использования вторичных ресурсов, а также повышение прочностных характеристик деревянных элементов [4, С. 459], [5, С. 99].

В работах [6, С. 317], [7, С. 24] отмечается, что армирование деревянных конструкций различными материалами позволяет повысить их несущую способность и жесткость, снизить расход древесины до 30%, применять древесину более низких сортов и значительно снизить стоимость конструкций “в деле”.

Эффективность клеевых соединений “древесина-арматура” в значительной степени зависит от качества подготовки поверхности контакта, обеспечивающего оптимальные условия для адгезионного взаимодействия [8, С. 145]. Поэтому выбор метода поверхностной обработки ОПЛП является ключевым фактором для обеспечения требуемых эксплуатационных характеристик армированных деревянных конструкций.

Цель настоящего исследования – определить влияние различных методов поверхностной обработки ОПЛП на адгезивную прочность клеевых соединений с древесиной и выбрать оптимальную технологию подготовки поверхности для армирования деревянных конструкций.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Исследования в области армирования деревянных конструкций ведутся на протяжении нескольких десятилетий. В работах [9, С. 100], [10, С. 22] было показано, что включение различных армирующих элементов в древесные композиты позволяет значительно улучшить их механические характеристики. Особый интерес представляют исследования по использованию вторичных металлических материалов в качестве арматуры [11, С. 37].

Применение эпоксидных клеев для соединения древесины с различными материалами исследовано в работах [12, С. 81], [13, С. 176]. Показано, что эпоксидные композиции обеспечивают высокую прочность соединений при правильной подготовке поверхности контакта. Важность подготовки поверхности для обеспечения адгезии подчеркивается в работах [14, С. 244], [15, С. 96].

Методы поверхностной обработки металлов для улучшения адгезии с полимерными материалами рассматриваются в работах [16, С. 260], [17, С. 135]. Механическая обработка, включая создание шероховатости, является одним из наиболее эффективных способов повышения адгезионной прочности [18, С. 247].

Исследования возможности использования отработанных металлорежущих инструментов в строительных конструкциях представлены в работах, где показана перспективность данного направления для решения экологических и экономических задач.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для проведения экспериментальных исследований использовались образцы древесины сосны обыкновенной с размером поперечного сечения 50×50 мм и длиной 200 мм. Выбор древесины сосны обусловлен ее широким применением в строительстве, доступностью и хорошими технологическими свойствами [19, С. 9]. В качестве армирующих элементов использовались отработанные полотна ленточных пил, с поперечным сечением 1,1×25 мм и переменным шагом зубьев 10/14 [20, С. 235].

Всего было изготовлено 15 образцов (по 5 образцов для каждого типа поверхностной обработки):

ОПЛП с обработанной поверхностью (маркировка ОЦ-1–ОЦ-5): механическое удаление гальванического слоя до основного металла с созданием шероховатости (рис. 1);

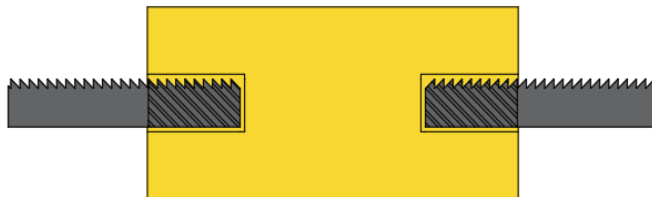


Рисунок 1. ОПЛП с нанесением царапин

ОПЛП с вертикальными насечками (маркировка ОН-1–ОН-5): нанесение вертикальных параллельных насечек по всей длине пильного полотна с шагом 20 мм (рис. 2);



Рисунок 2. ОПЛП с вертикальными насечками

ОПЛП с крестообразными насечками (маркировка ОК-1–ОК-5): нанесение крестообразных насечек по всей длине пильного полотна с шагом 200 мм (рис. 3).

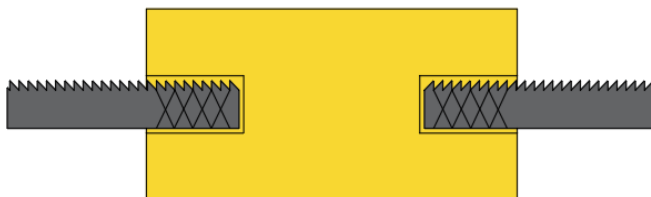


Рисунок 3. ОПЛП с крестообразными насечками

Паз в древесной заготовке для вклеивания ОПЛП выполнялся прямоугольной формы глубиной 3,7 мм и шириной 30,6 мм с помощью пазовой фрезы диаметром 10 мм на фрезере при частоте вращения шпинделя 30000 об/мин [21, С. 217].

Для клеевого соединения использовалась композиция на основе эпоксидной смолы ЭД-20 с отвердителем – полиэтиленполиамином (ПЭПА) в соотношении 100:12 по массе, с наполнителем – кварцевым песком (20% от массы смолы) и пластификатором – дибутилфталатом (5% от массы смолы) [22, С. 114].

Процесс подготовки образцов включал следующие этапы: 1. Подготовка древесных заготовок с устройством пазов; 2. Поверхностная обработка ОПЛП согласно экспериментальной программе; 3. Очистка и обезжиривание поверхностей; 4. Приготовление клеевой композиции; 5. Вклеивание ОПЛП в пазы древесных заготовок; 6. Отверждение клеевого соединения при температуре $20 \pm 2^\circ\text{C}$ в течение 72 часов.

Испытания на выдергивание проводились на разрывной машине РЭМ-100 с измерением максимальной разрушающей нагрузки. Скорость нагружения составляла 5 мм/мин согласно рекомендациям [23, С. 409].

Статистическая обработка результатов включала расчет среднего значения разрушающей нагрузки ($F_{\text{ср}}$), стандартного отклонения (σ), коэффициента вариации (CV) для каждой группы образцов. Достоверность различий оценивалась по критерию Стьюдента при уровне значимости $p = 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты испытаний образцов на выдергивание представлены в таблице 1.

Табл. 1. Результаты испытаний образцов на выдергивание

№ образца	ОПЛП с царапинами (F, кН)	ОПЛП с вертикальными насечками (F, кН)	ОПЛП с крестообразными насечками (F, кН)
1	11,1	8,7	9,8
2	12,3	8,5	10,0
3	10,7	9,1	10,2
4	10,8	8,6	9,9
5	11,5	9,8	9,75

Статистический анализ результатов испытаний представлен в таблице 2.

Табл. 2. Статистические параметры разрушающих нагрузок

Тип обработки	$F_{\text{ср}}$, кН	σ , кН	CV, %	Характер разрушения
Обработанная поверхность	11,28	0,67	5,94	По древесине
Вертикальные насечки	8,94	0,58	6,49	По металлу в области насечек
Крестообразные насечки	9,93	0,19	1,91	По металлу в области насечек

Анализ результатов показывает, что наибольшую адгезивную прочность демонстрируют образцы с ОПЛП, обработанными методом снятия гальванического слоя ($F_{ср} = 11,28$ кН). При данном типе обработки происходит разрушение по древесине, что свидетельствует о достижении максимально возможной прочности соединения в пределах прочности основного материала.

Образцы с крестообразными насечками показали промежуточные результаты ($F_{ср} = 9,93$ кН), при этом разрушение происходило по металлу в области насечек. Вертикальные насечки обеспечили наименьшую прочность ($F_{ср} = 8,94$ кН) с разрушением также по металлу.

Характер разрушения образцов представлен на (рис.4).

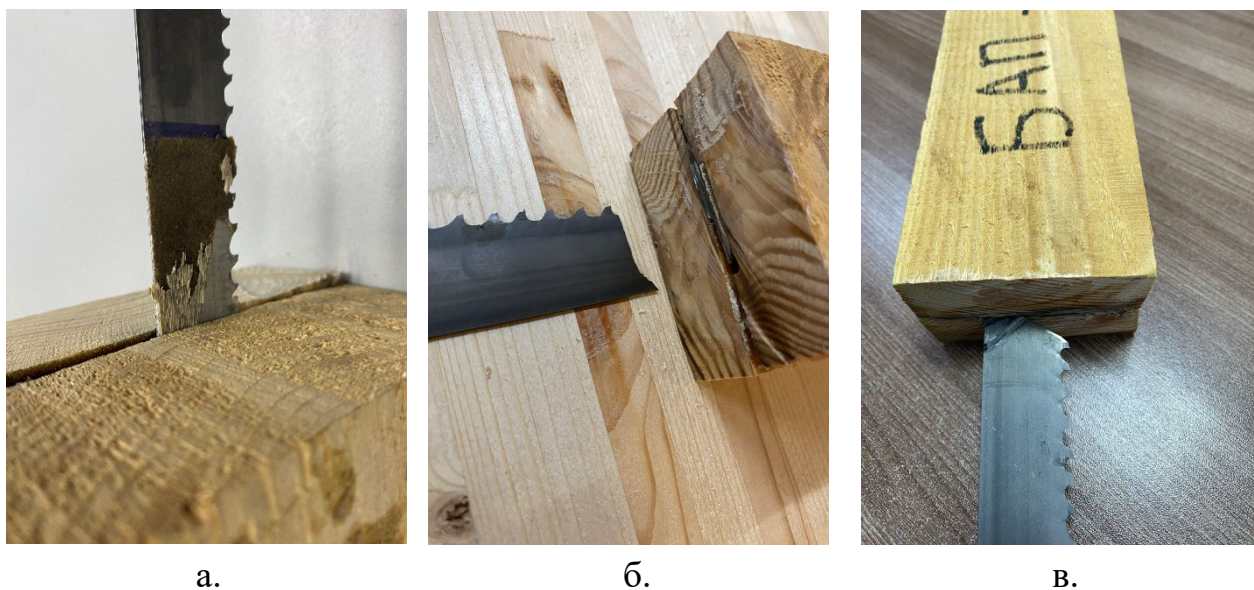


Рис. 4. Характер разрушения образцов: а. – ОПЛП с царапинами; б. – ОПЛП с вертикальными насечками; в. – ОПЛП с крестообразными насечками

Полученные результаты хорошо коррелируют с теоретическими представлениями о влиянии шероховатости поверхности на адгезионную прочность. Обработка поверхности путем удаления гальванического слоя создает оптимальную шероховатость, способствующую максимальному механическому сцеплению с клеевым составом.

Сравнительный анализ с традиционными видами арматуры показывает, что ОПЛП с оптимальной обработкой поверхности обеспечивают адгезивную прочность, близкую к прочности соединений со стальной арматурой (разница составляет около 3%), что подтверждает перспективность их применения в качестве армирующих элементов.

ВЫВОДЫ

Наиболее эффективным способом поверхностной обработки ОПЛП для обеспечения высокой адгезивной прочности с древесиной является механическое удаление гальванического слоя с созданием шероховатости ($F_{ср} = 11,28$ кН).

Нанесение вертикальных насечек обеспечивает наименьшую адгезивную прочность ($F_{ср} = 8,94$ кН), что объясняется концентрацией напряжений в узких насечках.

Крестообразные насечки занимают промежуточное положение ($F_{ср} = 9,93$ кН) и обеспечивают большую прочность по сравнению с вертикальными насечками.

Характер разрушения образцов с ОПЛП при оптимальной обработке поверхности происходит по древесине, что свидетельствует о достижении максимально возможной прочности соединения.

Полученные результаты подтверждают перспективность использования ОПЛП в качестве армирующих элементов для деревянных конструкций, что позволяет решить проблему утилизации отходов деревообрабатывающей промышленности.

Применение ОПЛП в качестве арматуры может обеспечить экономию до 15-20% стоимости армированных деревянных конструкций за счет использования вторичных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Георгиев С. В., Соловьева А. И., Маилян Д. Р. Изменение относительных деформаций в композитных материалах центрально сжатых железобетонных стоек. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2022;1(3):24-34

2. Погорельцев А. А. Поперечное армирование деревянных конструкций клееными стержнями из древесных материалов. Экспериментальные и теоретические исследования строительных конструкций: *Сборник научных трудов*. Москва: ЦНИИ строительных конструкций им. В.А. Кучеренко; 1987. С. 41-47.

3. Римшин В. И., Рощина С. И. Экспериментальные исследования композитных деревянных балок с локальной модификацией древесины. *IOP Conf Ser: Mater Sci Eng*. 2019;687:033039.

4. Шилов Д. А., Веремеенко А. А., Шилов А. В., Маилян Д. Р. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния сжатых железобетонных стоек, усиленных композитными материалами. *Инженерный вестник Дона*. 2024;5(113):457-474.

5. Кула К., Соха Т. Реновация и усиление деревянных балок с использованием лент CFRP с учетом реологических эффектов. *Civ Environ Eng Rep*. 2016;22(3):93-102.

6. Корради М., Сперанзини Э., Борри А., Виньоли А. Усиление деревянных балочных перекрытий на сдвиг с использованием FRP. *Compos Part B Eng*. 2006;37(4-5):310-319.

7. Рескальво Ф. Х., Вальверде-Паласьос И., Суарез Э., Гальего А. Экспериментальное сравнение различных углеродных композитов в схемах армирования деревянных балок исторических зданий. *Materials*. 2017;10:1113.

8. Попова М. В., Тужилова М. В., Репин В. А. Напряженное состояние балок с раскосной перфорацией. Международная конференция по физике материалов, строительным конструкциям и технологиям в строительстве, промышленной и производственной инженерии (МРСРЕ-2024): *Сборник трудов V Международной научно-технической конференции*, Владимир, 23–25 апреля 2024 года. Владимир: АРКАИМ; 2024. С. 141-147.

9. Крицин А. В., Лихачева С. Ю., Любов Д. М., Тихонов А. В. Анализ методов расчета деревянных изгибаемых элементов, усиленных углеродным волокном. *Региональная архитектура и строительство*. 2014;4:97-104.

10. Уточкин, Е. А. Экологические аспекты производства и утилизации новых материалов: жизненный цикл и устойчивое развитие / Е. А. Уточкин, Д. О. Мясников // Дни науки студентов ИАСЭ - 2025 : Материалы научно-практической конференции. – Владимир : Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, 2025. – С. 332-339.

11. Рощина С. И. Армирование - эффективное средство повышения надежности и долговечности деревянных конструкций. *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. 2008;(2):12.

12. Карельский А. В., Журавлева Т. П., Лабудин Б. В. Испытание на изгиб деревянных составных балок, соединенных металлическими зубчатыми пластинами, разрушающей нагрузкой. *Инженерно-строительный журнал*. 2015;2(54):77-85.

13. Мартынов В. А., Мясников Д. О., Рощина С. И. Исследование прочности и деформативности клееных деревянных балок с ламелями из термически поврежденной древесины сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на основе планирования эксперимента. *Лесотехнический журнал*. 2024;14(1):170-189.

14. Пятницкий А. А., Крутик С. А., Журенкова М. А. Возможности использования композиционных материалов на основе углепластика в деревянных конструкциях. *Научно-технический вестник Поволжья*. 2013;3:241-245.

15. Орлов А. О., Лабудин Б. В., Морозов В. С. Исследование прочности и жесткости коннектора с клеем и нагелем. *Вестник Поволжского государственного технологического университета*. Сер.: Материалы. Конструкции. Технологии. 2019;4(12):95-101.

16. Ивакин А. И., Иодчик А. А. Армирование как средство повышения несущей способности деревянных конструкций. *Материалы 59-й студенческой научно-технической конференции инженерно-строительного института ТОГУ*, 10–23 апреля 2019 года. ТОГУ: Тихоокеанский государственный университет; 2019. С. 257-260.

17. Попова М. В., Тужилова М. В. Устойчивость несущих конструкций против прогрессирующего обрушения. Безопасность строительного фонда России. *Проблемы и решения: материалы Международных академических чтений*, Курск, 18 ноября 2023 года. Курск: ЗАО «Университетская книга»; 2023. С. 131-138.

18. Ашкенази Е. К., Ганов Э. В. Анизотропия конструкционных материалов. Ленинград: Машиностроение; 1980. 247 с.

19. Георгиев С. В., Майлян Д. Р., Соловьева А. И. Новый метод усиления железобетонных сжатых колонн, основанный на использовании бетона и композита. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2022;1(2):4-12.

20. Фадеев Р. Н., Лисятников М. С. Развитие области применения модифицированной древесины в комбинированных клееных деревянных конструкциях. *Международная конференция по физике материалов*,

строительным конструкциям и технологиям в строительстве, промышленной и производственной инженерии (МРСРЕ-2024): Сборник трудов V Международной научно-технической конференции, Владимир, 23–25 апреля 2024 года. Владимир: АРКАИМ; 2024. С. 230-236.

21. Блохина Н. С., Галкин А. Г. Компьютерный анализ пространственной работы балок из древесины, армированных поперечной арматурой. *Инновации и инвестиции*. 2016;10:216-218.

22. Устарханов О. М., Муселемов Х. М., Вишталов Р. И., Устарханов Т. О. Клееные армированные балки. Махачкала: ИП Овчинников Михаил Артурович (Типография Алеф); 2016. 114 с.

23. Pacheco-Torgal F., Cabeza L.F., Labrincha J. 17 - Comparing the environmental impact of reinforced concrete and wooden structures, Editor(s): F. Pacheco-Torgal, L.F. Cabeza, J. Labrincha, A. de Magalhães, *Eco-efficient Construction and Building Materials*, Woodhead Publishing, 2014, Pages 407-433,