

## Влияние микрогеометрии пильного полотна на адгезионную прочность композитов «дерево–металл»

*Д.О. Мясников, Е.О. Ощепкова*

*Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых,  
Владимир*

**Аннотация:** В статье исследуется влияние параметров шероховатости поверхности отработанного пильного полотна на несущую способность клеевых соединений в деревометаллических композитах. Рассмотрены различные способы подготовки поверхности стали, включая механическую и абразивную обработку. Основное внимание уделено установлению количественной связи между шероховатостью металлической поверхности и прочностью клеевого соединения при варьировании глубины армирования и состава клеевого слоя. Экспериментальные исследования выполнены по методике многофакторного планирования Протодяконова–Тедера. Установлено, что способ обработки поверхности оказывает определяющее влияние на несущую способность соединения, а оптимальная шероховатость обеспечивает максимальное механическое сцепление между клеем и металлом.

**Ключевые слова:** многофакторный эксперимент, шероховатость, несущая способность, деревометаллический композит, клеевое соединение, отработанное пильное полотно.

### Введение

Современное строительное производство активно внедряет принципы устойчивого развития, включая вторичное использование техногенных отходов. Перспективным решением является применение отработанных пильных полотен в качестве армирующих элементов в деревометаллических композитах (ДМК), что способствует снижению экологической нагрузки и повышению механических характеристик деревянных конструкций [1].

Эффективность ДМК определяется качеством клеевого соединения на границе «древесина—металл». В гетерогенных системах адгезия обеспечивается преимущественно механическим зацеплением, обусловленным микрогеометрией поверхности металла [2]. Шероховатость измерялась на профилометре Mitutoyo SurfTest SJ-201 (ISO 1997,  $\lambda_c = 2,5$  мм). Параметры шероховатости:  $R_a$  — среднее арифметическое отклонение профиля (мкм),  $R_z$  — высота неровностей по десяти точкам (мкм).

Параметры шероховатости ( $R_a$ ,  $R_z$  и др.) являются ключевыми факторами, влияющими на несущую способность клеевого шва: оптимальная шероховатость формирует микрозамковые структуры, тогда как её избыток приводит к образованию незаполненных клеем зон и концентрации напряжений. Добавление кварцевого песка в клей позволяет регулировать его реологические и прочностные свойства.

Недостаточно изучено совместное влияние шероховатости, глубины армирования и состава клея на прочность соединения при сдвиге. В работе экспериментально исследовано влияние способа обработки поверхности пильного полотна (без обработки, наждачный круг K46, наждачная бумага №40, пескоструй), глубины армирования (60 – 80 – 100 мм) и содержания песка в клее (10 – 20 – 30 %) на несущую способность ДМК. Исследования выполнены по методике многофакторного планирования Протодяконова–Тедера для количественной оценки вклада каждого фактора и выявления оптимальных режимов [3].

### Материалы и методы

В исследовании оценивалось влияние микрогеометрии поверхности отработанного пильного полотна на несущую способность деревометаллических клеевых соединений, определяемую по разрушающей нагрузке при сдвиге ( $H$ ) [4]. Эксперимент выполнен по методике многофакторного планирования Протодяконова–Тедера с тремя варьируемыми факторами [5]: способом обработки поверхности ( $S_1$ – $S_4$ : без обработки, наждачный круг K46, наждачная бумага №40, пескоструй), глубиной армирования (60, 80, 100 мм) и содержанием кварцевого песка в клее (10%, 20%, 30%) [6].

Шероховатость измерялась на профилометре Mitutoyo SurfTest SJ-201 (ISO 1997,  $\lambda_s = 2,5$  мм). Максимальные параметры шероховатости получены при обработке K46 ( $R_a = 4,00$  мкм,  $R_z = 15,77$  мкм), минимальные — при

использовании наждачной бумаги №40 ( $R_a = 0,56$  мкм,  $R_z = 4,39$  мкм); пескоструй обеспечил промежуточные значения ( $R_a = 1,68$  мкм,  $R_z = 13,67$  мкм).

Образцы изготавливались по ГОСТ 14202–2019 на сосновой древесине (влажность 12%), с клеевым швом толщиной 2,5 мм и выдержкой 7 суток. Испытания проводились на машине РЭМ-100 при скорости 2 мм/мин. На каждый из 36 факторных узлов изготовлено по 3 образца (108 испытаний). Максимальная нагрузка — 12 933 Н — достигнута при обработке К46, глубине 100 мм и 20% песка, что подтверждает значимость всех факторов и наличие оптимального режима [7].

Таблица № 1

Абсолютные значения параметров шероховатости поверхности  
отработанного пильного полотна при различных видах обработки

Способ обработки	$R_a$ , мкм	$R_z$ , мкм	$R_q$ , мкм	$R_t$ , мкм	$R_p$ , мкм
Без обработки	1.00	6.76	1.23	8.35	2.92
Наждачный круг К46	4.00	15.77	2.62	24.96	7.29
Наждачная бумага №40	0.56	4.39	0.69	6.08	2.40
Пескоструйная обработка	1.68	13.67	2.12	16.90	6.15

Таблица № 2

Средняя несущая способность, Н

Способ обработки	60 мм	80 мм	100 мм
Без обработки	5833	7000	8100
Наждачный круг К46	9667	11433	12933
Наждачная бумага №40	6367	7400	8767
Пескоструйная обработка	8067	9067	10367

Полученные экспериментальные данные послужили основой для последующего статистического анализа, построения эмпирических зависимостей и выявления оптимальных режимов формирования

деревометаллических композитов на базе отработанных материалов [8]. Это позволило не только установить ранг значимости факторов, но и оценить их совместное влияние на конечную прочность соединения.

### Результаты исследования

Анализ данных показал, что максимальная несущая способность (12 933 Н) достигнута при комбинации: обработка наждачным кругом К46, глубина армирования 100 мм, содержание песка в клее 20%. Наименьшая прочность (5150 Н) зафиксирована у образца без обработки поверхности пильного полотна при глубине 60 мм и 10% песка.

Для оценки вклада каждого фактора в отдельности проведено усреднение результатов (табл. 3–5).

Таблица № 3

Усреднение по фактору «S» (способ обработки поверхности)

Способ обработки	Средняя нагрузка, Н
Без обработки	6978
Наждачный круг К46	11344
Наждачная бумага №40	7556
Пескоструйная обработка	9167

Таблица № 4

Усреднение по фактору «L» (глубина армирования)

Глубина армирования, мм	Средняя нагрузка, Н
60	7508
80	8725
100	9825

Таблица № 5

Усреднение по фактору «L» (глубина армирования)

Содержание песка, %	Средняя нагрузка, Н
10	8367
20	8900
30	8600

Наибольшее влияние на несущую способность оказывает способ обработки поверхности [9]. Обработка наждачным кругом K46 обеспечивает максимальную прочность, что напрямую коррелирует с наибольшими значениями параметров шероховатости, в первую очередь Ra.

### Выводы

В результате статистической обработки установлено, что параметр Ra является наиболее информативным индикатором качества подготовки поверхности. Коэффициент корреляции между Ra и разрушающей нагрузкой составляет  $r = 0.92$  ( $p < 0.01$ ), что указывает на сильную положительную связь. Это позволяет рекомендовать Ra в качестве ключевого параметра при проектировании технологий подготовки поверхности для клеевых соединений [10].

### Литература

1. Мартынов В.А. Исследование прочности и деформативности клеевых деревянных балок с ламелями из термически поврежденной древесины сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на основе планирования эксперимента // Лесотехнический журнал. 2024. № 1(53). С. 170–189.
2. Singh H. Influence of processing conditions and electrode materials on the surface roughness of hybrid metal matrix composites processed by EDM. 2024. № 3(7). С. 480–493.
3. Резник Н.А. Многофакторный эксперимент (технология и результаты). Образовательные технологии и общество. 2012. № 1(15). С. 436–452.
4. Кощев А.А. Эффективность прямолинейного армирования деревянных балок перекрытий стальной тросовой арматурой без предварительного натяжения. Системы. Методы. Технологии. 2021. № 2(50). С. 100–105.

5. AlFulwah A., AlOtaibi N.M.T. Effect of surface treatment on the repair bond strength of OMNICHROMA and Charisma Diamond ONE resin composites bonded to variable substrates. Heliyon. 2023. Vol. 9, iss. 7. URL: doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14301 (дата обращения: 25.12.2025).

6. Лисятников М.С., Чибрикин Д.А., Прусов Е.С. Прочностные характеристики полимерных композиционных материалов для строительных конструкций. Известия высших учебных заведений. Строительство. 2025. № 2(794). С. 139–150.

7. Кавелин А.С., Тютин А.Д., Нуриев В.Э., Колтакова В.А. Армирование деревянных конструкций. Инженерный вестник Дона. 2019. № 8. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2019/59/ (дата обращения: 25.12.2025).

8. Фадеев Р.Н., Лисятников М.С. Развитие области применения модифицированной древесины в комбинированных клееных деревянных конструкциях // Сборник трудов V Международной научно-технической конференции по физике материалов, строительным конструкциям и технологиям в строительстве, промышленной и производственной инженерии. 2024. С. 230–236.

9. Линьков В.И. Напряженное состояние наклонных металлических стержней в деревянных элементах составного сечения. Инженерный вестник Дона. 2019. № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/52/ (дата обращения: 25.12.2025).

10. Черных А.Г., Миронова С.И. Стойкость клеевых соединений деревянных конструкций на отечественных меламино-мочевино-формальдегидных клеях к циклическим температурно-влажностным воздействиям. Инженерный вестник Дона. 2023. № 10. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2023/106/

## References

1. Martynov V.A. Lesotekhnicheskiiy zhurnal. 2024. No. 1(53). Pp. 170–189.

---

2. Singh H. Influence of processing conditions and electrode materials on the surface roughness of hybrid metal matrix composites processed by EDM. 2024. No. 3(7). Pp. 480–493.
3. Reznik N.A. Obrazovatel'nye tekhnologii i obshchestvo. 2012. No. 1(15). Pp. 436–452.
4. Koshcheev A.A. Sistemy. Metody. Tekhnologii. 2021. No. 2(50). Pp. 100–105.
5. AlFulwah A., AlOtaibi N.M.T. Heliyon. 2023. Vol. 9, iss. 7. URL: doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14301 (accessed 25.12.2025).
6. Lisyatnikov M.S., Chibrikhin D.A., Prusov E.S. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo. 2025. No. 2(794). Pp. 139–150.
7. Kavelin A.S., Tyutina A.D., Nuriev V.E., Koltakova V.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2019. No. 8. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2019/59/ (accessed 25.12.2025).
8. Fadeev R.N., Lisyatnikov M.S. Sbornik trudov V Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii po fizike materialov, stroitel'nykh konstruktsiyam i tekhnologiyam v stroitel'stve, promyshlennoy i proizvodstvennoy inzhenerii. 2024. Pp. 230–236.
9. Linkov V.I. Inzhenernyj vestnik Dona. 2019. No. 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/52/ (accessed 25.12.2025).
10. Chernykh A.G., Mironova S.I. Inzhenernyj vestnik Dona. 2023. No. 10. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2023/106/ (accessed 25.12.2025).

**Авторы согласны на обработку и хранение персональных данных.**

**Дата поступления: 18.11.2025**

**Дата публикации: 6.01.2026**