

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ/CONSTRUCTION STRUCTURES, BUILDINGS AND STRUCTURESDOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.76.2>

EDN: IWOFPQ

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА СТЕКЛОПЛАСТИКОВОГО И ТКАНЕВОГО АРМИРОВАНИЯ ДЕРЕВЯННЫХ БАЛОК ПО УСЛОВНОМУ ПОКАЗАТЕЛЮ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ПРИ ТРЁХТОЧЕЧНОМ ИЗГИБЕ

Научная статья

Бусаргин Д.А.^{1,*}¹ ORCID : 0009-0003-1668-7978;¹ Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва, Саранск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (busargin20[at]mail.ru)

Предложена: 28.07.2026; Принята: 25.08.2026; Опубликовано: 21.09.2026

Аннотация

Испытаны 30 сосновых балок 100×100×400 мм при трёхточечном изгибе с пролётом 300 мм: контрольная серия, серия с двумя стеклопластиковыми стержнями в пазах растянутой грани и серия со слоем углеродной ткани 400 г/м². Надрезы на образцах не выполнялись, поэтому результат оценён двумя величинами сразу: условным разрушающим напряжением σ и условным показателем трещиностойкости K^* по формуле образца типа 1 ГОСТ 29167-2021 при $a_0 = 35$ мм. Показано, что K^* характеристикой материала не является: при изменении a_0 от 15 до 50 мм абсолютные значения меняются в 2,6 раза, а ранжирование серий сохраняется. Углеткань при корректной наклейке даёт прирост 14,5% ($p = 0,017$). Стержни дают 10,8%, что при десяти образцах на серию статистически не подтверждается. Сравнение серий по разрушающим нагрузкам эффект армирования скрывает: контрольные балки имели на 10% больший момент сопротивления. Образец с тканью, ошибочно наклеенной в сжатой зоне, показал минимальное значение серии — на 25% ниже среднего.

Ключевые слова: древесина, деревянная балка, армирование, стеклопластиковая арматура, углеродная ткань, трёхточечный изгиб, условный показатель трещиностойкости, растянутая зона, коэффициент вариации, сосна.

A COMPARATIVE EVALUATION OF FIBREGLASS AND FABRIC REINFORCEMENT OF TIMBER BEAMS BASED ON A PROVISIONAL CRACK RESISTANCE INDICATOR UNDER THREE-POINT BENDING

Research article

Busargin D.A.^{1,*}¹ ORCID : 0009-0003-1668-7978;¹ National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russian Federation

* Corresponding author (busargin20[at]mail.ru)

Suggested: 28.07.2026; Accepted: 25.08.2026; Published: 21.09.2026

Abstract

30 pine beams measuring 100×100×400 mm were tested under three-point bending with a span of 300 mm: a control series, a series with two fibreglass rods in the grooves of the tension face, and a series with a layer of carbon fibre fabric weighing 400 g/m². No notches were made in the specimens; therefore, the results were evaluated using two parameters simultaneously: the provisional ultimate stress σ and the provisional crack resistance index K^* , calculated using the formula for Type 1 specimens in GOST 29167-2021 with $a_0 = 35$ mm. It has been shown that K^* is not a characteristic of the material: when a_0 varies from 15 to 50 mm, the absolute values change by a factor of 2.6, while the ranking of the series remains unchanged. When applied correctly, the carbon fabric yields an increase of 14.5% ($p = 0.017$). Reinforcing rods yield a 10.8% increase, which, with ten specimens per series, is not statistically significant. A comparison of the series in terms of ultimate loads masks the reinforcement effect: the control beams had a 10% greater moment of resistance. The specimen with the fabric erroneously applied in the compression zone showed the lowest value in the series — 25% below the mean.

Keywords: timber, timber beam, reinforcement, fibreglass reinforcement, carbon fibre fabric, three-point bending, provisional crack resistance indicator, tension zone, variation coefficient, pine.

Введение

Деревянная балка при изгибе разрушается по растянутой зоне. Прочность древесины на растяжение вдоль волокон резко падает у сучка или косослоя, поэтому судьбу элемента решает одно слабое сечение. Композитное усиление устраняет это ограничение: работу растянутой грани принимает материал, лишённый природных пороков. Вопросы усиления и расчёта деревянных конструкций регулярно рассматриваются в отечественной периодике [1], [2]. Зарубежные эксперименты со стержнями и тканями на изгибаемых балках известны с начала 2000-х годов [3], [4], позже подтверждены для клеёных балок с FRP-пластинами [5] и обобщены в обзоре [6].

Измерение этого преимущества, однако, затруднено разбросом прочности самой древесины. Разрушение развивается ступенчато: отказы структурных связей видны на диаграммах сбросами нагрузки [7], [8], а прочность задаётся строением материала и его пороками [9], [10]. Для серии из десяти балок коэффициент вариации 13% —

типичная величина. Прирост 10% на таком фоне неразличим, и судить об эффекте усиления без статистической обработки по группам нельзя.

Для практики существен выбор между двумя схемами: стержни или ткань. Работ, где обе схемы проверены на одной породе, одном типоразмере и одной схеме нагружения, почти нет. В настоящей работе испытаны три серии сосновых балок по схеме образца типа 1 ГОСТ 29167-2021 [11]. Дополнительно оценены последствия ошибки в положении армирования: в трёх образцах усиление при изготовлении оказалось у сжатой грани.

Каждая серия оценивалась двумя показателями сразу. Первый — условное напряжение при изгибе; оно не требует гипотез механики разрушения. Второй — условный показатель трещиностойкости по формуле ГОСТ. Совпадение результатов служит внутренней проверкой: если оба показателя приводят к одному выводу, эффект не порождён способом обработки данных.

Методы и принципы исследования

Балки номинальным сечением 100×100 мм и длиной 400 мм выпилены из соснового бруса камерной сушки. Влажность 8–10%, выдержка до постоянной массы по ГОСТ 16483.0-78 [12]. Размеры каждого образца измерялись перед испытанием (таблица 1). Собраны три серии по 10 образцов. Первая — контрольная, без усиления. Во второй в растянутой грани профрезерованы два продольных паза; в них на эпоксидный клей ЭДП вклеены стеклопластиковые стержни периодического профиля, пазы затем зашпаклёваны тем же составом. Образцы 1–5 этой серии армированы стержнями Ø8 мм, образцы 6–10 — Ø10 мм. В третьей серии на растянутую грань эпоксидной смолой ЭД-20 наклеен слой углеродной ткани 400 г/м² с прикаткой и выдержкой до полного отверждения. Масса образцов после усиления осталась в пределах 1,8–2,3 кг, то есть прирост несущей способности обеспечивается практически без утяжеления элемента. Готовые образцы показаны на рис. 1.

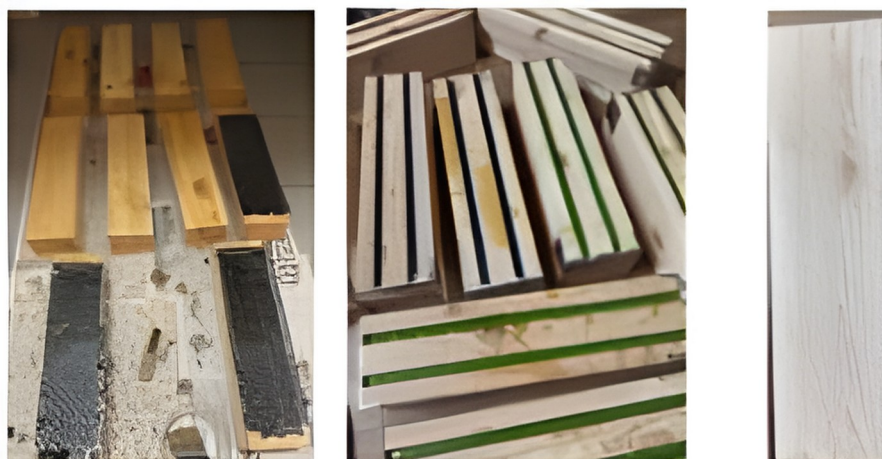


Рисунок 1 - Готовые образцы: с углетканью, со стеклопластиковой арматурой и без армирования

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.76.2.1>

Испытания выполнены на разрывной машине Р-20. Схема — трёхточечный изгиб призмы квадратного сечения силой в середине пролёта (рис. 2) при расстоянии между опорами $L_0 = 300$ мм, нагружение монотонное до разрушения. Машина фиксировала только разрушающую нагрузку F_c . Диаграмма «нагрузка — перемещение», прогибы и деформации армирующих элементов не записывались; последствия этого ограничения рассмотрены ниже.

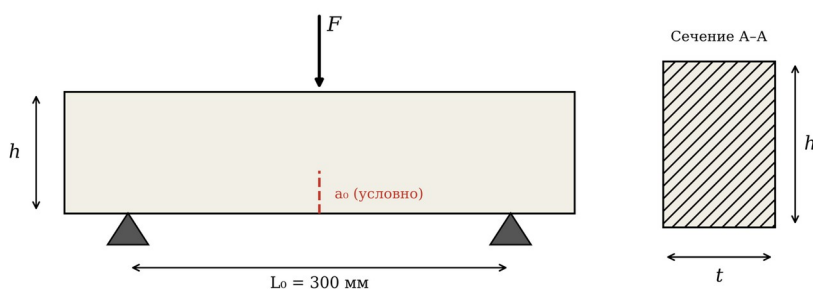


Рисунок 2 - Схема нагружения по типу образца 1 ГОСТ 29167-2021

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.76.2.2>

Примечание: t – ширина сечения, h – высота сечения в направлении развития трещины; растянутая грань и армирование – снизу; пунктиром показана условная зона начального дефекта a_0

Разрушающие нагрузки образцов непосредственно несопоставимы, поскольку фактические сечения различаются. Нагрузку приводили к размерам образца двумя способами. Первый способ — условное разрушающее напряжение при изгибе:

$$\sigma = \frac{3 \cdot F_c \cdot L_0}{2 \cdot t \cdot h^2} \quad (1)$$

где F_c — разрушающая нагрузка, МН; t — ширина сечения, м; h — высота сечения в направлении развития трещины, м. Предел прочности при статическом изгибе по ГОСТ 16483.3-84 [13] в работе не определялся: величина σ условная и служит только для сравнения серий между собой.

Второй способ — условный показатель трещиностойкости K^* по формуле для образца типа 1 ГОСТ 29167-2021:

$$K^* = \left[\frac{3 \cdot F_c \cdot L_0}{2 \cdot t \cdot h^2} \right] \cdot \sqrt{a_0} \cdot (1,93 - 3,07\lambda + 14,53\lambda^2 - 25,11\lambda^3 + 25,8\lambda^4) \quad (2)$$

где a_0 — условная длина начального дефекта, м; $\lambda = a_0/h$. Все размеры принимались фактическими.

Необходима методическая оговорка. Надрезы на балках не выполнялись, стартовым концентратором служили природные дефекты растянутой грани. Формула (2) выведена для тела с макротрещиной известной геометрии, а сучок или косослой острой трещиной не являются. Поэтому величина обозначена K^* и понимается только как условный сравнительный показатель: она описывает сопротивление образца началу разрушения при одинаковой для всех серий условной геометрии дефекта. Физической константой материала она не является, и приравнивать её к критическому коэффициенту интенсивности напряжений K_{Ic} нельзя. Для получения K_{Ic} нужны балки с надрезами по ГОСТ 29167-2021.

Значение $a_0 = 35$ мм ($\lambda \approx 0,35$) принято по глубине нижнего надреза стандартно подготовленных образцов типа 1 из предыдущей работы [7] — ради сопоставимости с ранее опубликованными данными. Выбор произволен, поэтому зависимость выводов от этого параметра проверена отдельно (рис. 4).

Для каждой серии считались среднее, стандартное отклонение и коэффициент вариации V . Средние сравнивались с контролем критерием Уэлча с 95%-м доверительным интервалом разности и величиной эффекта d Коэна; параллельно применялся критерий Манна–Уитни, дающий близкие значения. Дисперсии подгрупп проверялись F -критерием и критерием Левене. Уровень значимости 0,05.

Основные результаты

Размеры сечений, разрушающие нагрузки и вычисленные по формуле (2) значения K^* приведены в таблице 1, сводные данные по сериям — в таблице 2. Звёздочкой помечены три образца, у которых армирование при изготовлении оказалось у сжатой грани.

Таблица 1 - Размеры сечений, разрушающая нагрузка и условный показатель трещиностойкости по образцам

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.76.2.3>

№	$t \times h$, мм (б/а)	F_c , кН (б/а)	K^* (б/а)	$t \times h$, мм (СПА)	F_c , кН (СПА)	K^* (СПА)	$t \times h$, мм (УТ)	F_c , кН (УТ)	K^* (УТ)
1	104×104	58,1	8,33	103×105	55,7	7,89	100×100	65,5	10,73
2	104×104	58,8	8,44	100×100	61,2	10,03	100×100	69,4	11,37
3	104×104	60,8	8,72	100×103	55,3	8,44*	100×100	62,8	10,28
4	104×104	63,7	9,14	100×102	76,9	12,01	100×100	59,4	9,74
5	102×101	47,9	7,50	102×102	54,5	8,35	100×100	53,0	8,68
6	104×104	51,0	7,31	100×100	55,5	9,09	100×100	60,8	9,96
7	103×100	44,3	7,05	102×102	58,8	9,01*	100×100	59,6	9,77
8	104×104	58,1	8,33	100×100	60,8	9,96	100×100	45,1	7,39*
9	103×103	63,5	9,42	100×100	57,3	9,38	100×100	59,6	9,77
10	103×103	73,5	10,90	101×101	58,8	9,32	100×100	52,2	8,55
Ср.	—	58,0	8,51	—	59,5	9,35	—	58,7	9,62
V , %	—	—	13,3	—	—	12,4	—	—	12,0

Примечание: б/а – без армирования; СПА – стеклопластиковая арматура (обр. 1–5 – Ø8 мм, обр. 6–10 – Ø10 мм); УТ – углеткань; K^* в МПа·√м; * – армирование ошибочно расположено в сжатой зоне

Таблица 2 - Сводные результаты по сериям

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.76.2.4>

Серия	n	F_c , кН	σ , МПа	$V(\sigma)$, %	K^* , МПа $\cdot\sqrt{м}$	Прирост σ , %	Прирост K^* , %
Контроль	10	58,0	23,67	13,5	8,51	—	—
СПА, все	10	59,5	25,82	12,2	9,35	+9,1	+9,8
СПА, корректные	8	60,1	26,22	13,0	9,50	+10,8	+11,6
УТ, все	10	58,7	26,43	12,0	9,62	+11,7	+13,0
УТ, корректные	9	60,3	27,12	9,1	9,87	+14,5	+15,9

По средней разрушающей нагрузке серии почти не отличаются: 58,0; 59,5 и 58,7 кН, разброс между ними менее 3%. Отсюда мог бы последовать вывод о неэффективности армирования, однако он был бы ошибочным. Контрольные балки имели большее сечение — в среднем 103,5×103,1 мм против 100,0×100,0 мм у тканевой серии. Их момент сопротивления составил 183 см³ против 167 см³, то есть на 10% больше, и этот запас геометрии компенсировал отсутствие усиления. После приведения к фактическим размерам прирост условного напряжения составляет 9,1% у стержневой схемы и 11,7% у тканевой.

Оба показателя дают согласованный ответ. По условному напряжению приросты равны 9,1 и 11,7%, по условному показателю трещиностойкости — 9,8 и 13,0%; расхождение не превышает полутора процентных пунктов. Величина σ вычисляется без каких-либо допущений о геометрии дефекта, поэтому совпадение означает, что эффект армирования не порождён выбором a_0 .

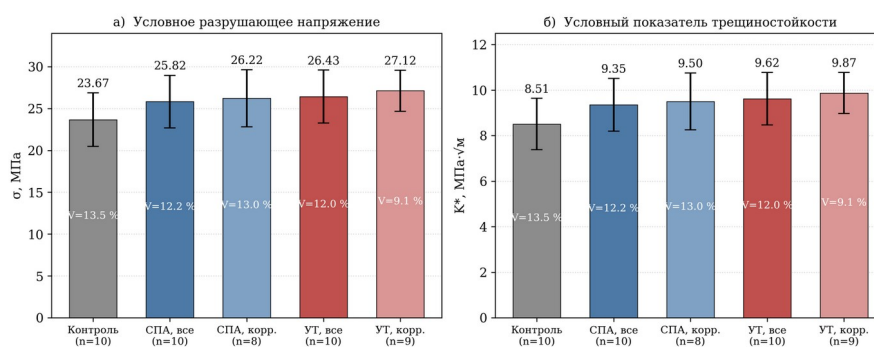


Рисунок 3 - Средние значения условного разрушающего напряжения (а) и условного показателя трещиностойкости (б) по сериям

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.76.2.5>*Примечание: планки – стандартное отклонение, V – коэффициент вариации*

Статистическая проверка (таблица 3) оставляет значимым только один эффект. Углеткань при правильной наклейке даёт прирост условного напряжения 3,44 МПа, доверительный интервал от 0,69 до 6,19 МПа, $p = 0,017$. У стеклопластиковой арматуры интервал разности включает ноль. При этом величина эффекта d Коэна равна 0,68–0,83, что соответствует среднему и большому эффекту: выборке недостаёт статистической мощности. По оценке, для подтверждения стержневой схемы на уровне 0,05 требуется 25–30 образцов на серию. Пока корректной остаётся формулировка «устойчивая тенденция».

Таблица 3 - Сравнение серий с контрольной

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.76.2.6>

Сравнение	$\Delta\sigma$, МПа	95 % ДИ (σ)	p (σ)	ΔK^*	95 % ДИ (K^*)	p (K^*)	d Коэна
СПА, все	+2,15	[−0,83; +5,13]	0,148	+0,83	[−0,24; +1,91]	0,121	0,68–0,73
СПА, корректные	+2,55	[−0,81; +5,91]	0,126	+0,99	[−0,23; +2,21]	0,103	0,77–0,83
УТ, все	+2,76	[−0,23; +5,75]	0,068	+1,11	[+0,03; +2,18]	0,044	0,87–0,97

Сравнение	$\Delta\sigma$, МПа	95 % ДИ (σ)	p (σ)	ΔK^*	95 % ДИ (K^*)	p (K^*)	d Коэна
УТ, корректные	+3,44	[+0,69; +6,19]	0,017	+1,36	[+0,37; +2,34]	0,010	1,21–1,33

Ошибка в положении армирования существенно снижает результат. Образец № 8 тканевой серии, где ткань попала к сжатой грани, показал $K^* = 7,39$ МПа $\cdot\sqrt{м}$ — минимум серии и на 25% ниже среднего по правильно армированным образцам. Если исключить все три образца с нарушенным расположением армирования, прирост по σ поднимается до 10,8% у стержневой схемы и до 14,5% у тканевой, а коэффициент вариации тканевой серии падает с 12,0 до 9,1% — ниже контрольных 13,5%.

Диаметр стержней на средний результат не повлиял: подгруппы Ø8 и Ø10 мм дали 9,34 и 9,35 МПа $\cdot\sqrt{м}$. Разброс при этом различается более чем вчетверо: коэффициент вариации 18,2% против 4,0%. Формальная проверка противоречива: F -критерий различия дисперсий подтверждает ($p = 0,006$), устойчивый к отклонениям от нормальности критерий Левене — нет ($p = 0,21$). При пяти образцах в подгруппе это тенденция, требующая проверки на большей выборке.

Зависимость от принятого a_0 показана на рис. 4. Абсолютное значение K^* контрольной серии при изменении a_0 от 15 до 50 мм меняется в 2,6 раза — от 5,00 до 12,81 МПа $\cdot\sqrt{м}$. Прирост тканевой серии при этом остаётся в пределах 11,6–15,4%, стержневой — 9,1–11,0%, а порядок серий сохраняется. Абсолютная величина K^* самостоятельного физического смысла не имеет; относительное сравнение серий устойчиво.

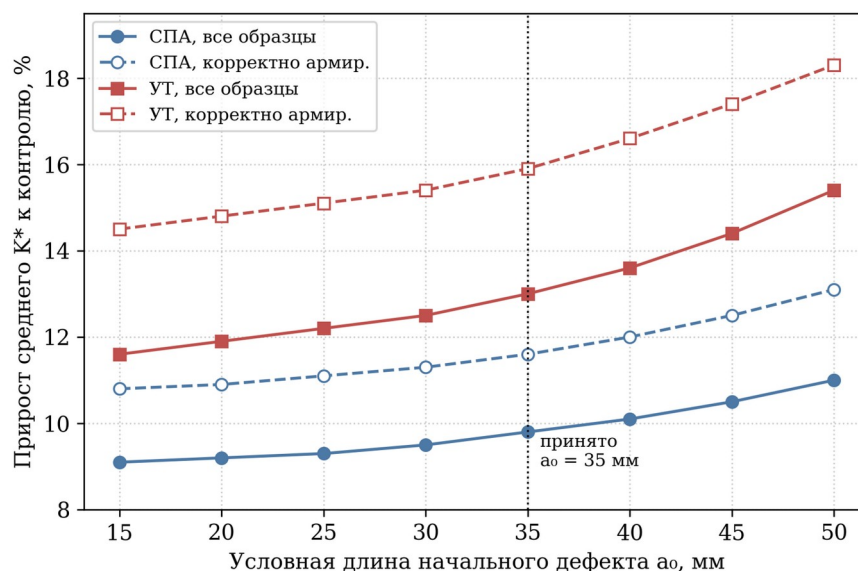


Рисунок 4 - Зависимость прироста среднего условного показателя трещиностойкости от принятой условной длины начального дефекта a_0

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.76.2.7>

Характер разрушения по сериям различался (рис. 5). Контрольные балки ломались хрупко: трещина стартовала от растянутой грани, чаще у сучка или косослоя, и быстро пересекала сечение с резким сбросом нагрузки. Балки со стержнями после максимума сохраняли остаточное сопротивление — арматура перехватывала раскрытие трещины и удерживала половинки. У балок с тканью разрушение шло заметно плавнее: сплошной слой перераспределял усилия вдоль растянутой грани и сдерживал выход трещины на кромку. Приведённые наблюдения носят качественный характер: диаграммы деформирования не записывались.

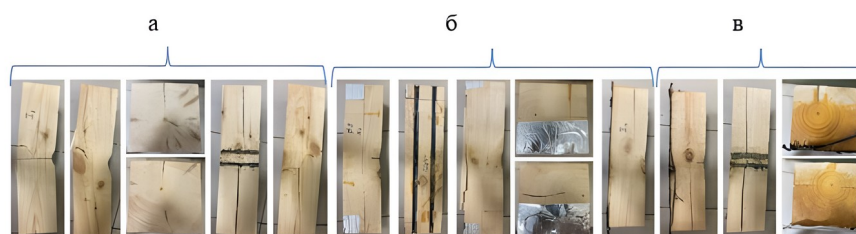


Рисунок 5 - Образцы после разрушения:
а – без армирования; б – со стеклопластиковой арматурой; в – с углетканью
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.76.2.8>

Обсуждение

Приросты 9–16% по порядку величины отвечают зарубежным данным для балок со стекло- и углекомпозитами [3], [4], [6]. Там эффект нередко выше, однако условия испытаний иные: выше коэффициент армирования, применяется предварительное напряжение, пролёты длиннее.

Влияние длины пролёта в настоящих испытаниях поддаётся прямой количественной оценке. При $L_0 = 300$ мм и высоте около 100 мм отношение нормальных напряжений к касательным равно $\sigma/\tau = 2L_0/h \approx 5,8$ –6,0. Средним разрушающим нагрузкам отвечают $\sigma = 23,7$ –26,4 МПа и $\tau = 4,07$ –4,41 МПа. Для малых чистых образцов сосны справочные значения составляют 70–80 МПа при изгибе и 6–7 МПа при скалывании вдоль волокон [10]. Прочность по скалыванию использована примерно на 0,65, по нормальным напряжениям — на 0,33, то есть вдвое меньше. При отношении пролёта к высоте, равном трём, разрушение во многом определяется сдвигом, тогда как армирование растянутой грани работает против изгиба. Отсюда следуют два вывода: умеренная величина эффекта и отсутствие прироста при переходе с Ø8 на Ø10 мм. Полученные значения следует рассматривать как нижнюю оценку для балок натуральных пролётов.

Вся разница между сериями укладывается в диапазон естественной вариации древесины [14]. Без обработки по группам эффект армирования остался бы неразличим на фоне разброса. Этим же объясняется, почему стержневая схема при $n = 10$ не достигает уровня значимости 0,05, хотя величина эффекта соответствует среднему.

Образец с тканью в сжатой зоне даёт наглядную иллюстрацию механики армирования. Композит, расположенный в сжатой зоне, балку не усиливает: растянутая зона остаётся без армирования, и несущую способность по-прежнему ограничивает прочность древесины на растяжение вдоль волокон с её пороками [9], [10]. Для технологии усиления [15] отсюда следует практическое требование: маркировка растянутой грани должна быть отдельной операцией технологической карты, а не подразумеваться.

Снижение разброса у тканевой серии до 9,1% против 13,5% у контроля объяснимо. Сплошной слой перекрывает локальные пороки растянутой грани и выравнивает работу образцов; у неармированных балок сопротивление задаёт самое слабое сечение, а разрушение идёт через последовательные отказы структурных связей [7], [8]. С практической точки зрения снижение разброса не менее ценно, чем прирост среднего. Расчёт по формуле $m = 1,65s$, отвечающей обеспеченности 0,95, даёт для условного напряжения 18,4 МПа у контроля, 20,6 МПа у стержневой схемы и 23,1 МПа у корректно армированной тканевой, то есть +12 и +25%. Прибавка от снижения вариации превышает прибавку среднего. Расчёт носит иллюстративный характер: он выполнен для условной величины и не заменяет назначения расчётного сопротивления. Переход к расчётным характеристикам по СП 64.13330.2017 [16] требует испытаний по нормируемым методикам с соответствующими коэффициентами надёжности и объёмами выборки.

Ограничения исследования

Границы применимости полученных данных очерчиваются пятью пунктами.

Первое: K^* — условный сравнительный показатель, а не характеристика трещиностойкости материала; образцы не имели надразов, длина начального дефекта принята условно, абсолютные значения зависят от этого выбора, и сопоставлять их с литературными данными по надрезанным образцам можно лишь качественно.

Второе: отношение пролёта к высоте равно трём при рекомендуемых для чистого изгиба пяти-шести высотах сечения, из-за чего наблюдаемый эффект занижен; ограничение общее для всех серий и сравнение между ними не искажает.

Третье: машина фиксировала только разрушающую нагрузку, поэтому напряжённо-деформированное состояние не анализировалось и вклад армирования в жёсткость не оценивался, а описание характера разрушения остаётся визуальным.

Четвёртое: десяти образцов на серию достаточно для тканевой схемы, но недостаточно для стержневой и тем более для суждений о расчётных сопротивлениях с нормируемой обеспеченностью.

Пятое: сечения серий различались (момент сопротивления 183 против 167–173 см³); формулы (1) и (2) это различие компенсируют, однако в дальнейших сериях группы следует формировать с одинаковыми номинальными сечениями.



Заключение

1. Приведённые значения K^* получены при условной длине начального дефекта 35 мм и применимы только для сопоставления серий между собой при едином a_0 . Характеристикой трещиностойкости древесины они не являются; для абсолютных значений необходимы балки с надрезами по ГОСТ 29167-2021.

2. Слой углеродной ткани 400 г/м² на растянутой грани при корректной наклейке повышает условное разрушающее напряжение на 14,5%, условный показатель трещиностойкости — на 15,9%. Эффект статистически значим: $p = 0,017$ по σ и $p = 0,010$ по K^* .

3. Стеклопластиковые стержни дают 10,8% по σ и 11,6% по K^* , но при десяти образцах на серию различие статистически не подтверждается ($p = 0,126$ и $0,103$). Результат следует трактовать как устойчивую тенденцию; для подтверждения требуется 25–30 образцов на серию.

4. Сравнение серий по разрушающим нагрузкам эффект армирования маскирует: средние нагрузки различаются менее чем на 3%, приведённые величины — на 9–16%. Причина в том, что контрольные балки имели на 10% больший момент сопротивления. Выводы по условному напряжению и по условному показателю трещиностойкости совпадают в пределах полутора процентных пунктов.

5. Положение армирования по высоте сечения критично: образец с углетканью в сжатой зоне дал минимум серии, на 25% ниже среднего по корректно армированным. Увеличение диаметра стержней с 8 до 10 мм среднее значение не меняет (9,34 и 9,35 МПа·√м), но сокращает разброс с 18,2 до 4,0%; при пяти образцах в подгруппе это тенденция.

6. Тканевое армирование снижает коэффициент вариации до 9,1% против 13,5% у контроля. Иллюстративный расчёт с обеспеченностью 0,95 показывает, что вклад снижения разброса в обеспеченное значение (+25%) превышает вклад прироста среднего (+14,5%).

Благодарности

Автор выражает благодарность научному руководителю Селяеву Владимиру Павловичу, академику РААСН, д.т.н., профессору, за консультирование при подготовке материалов настоящей статьи.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Acknowledgement

The author expresses gratitude to their research supervisor, Selyaev Vladimir Pavlovich, Academician of the Russian Academy of Agricultural Sciences, Doctor of Technical Sciences and Professor, for his guidance during the preparation of this article.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Кавелин А.С. Армирование деревянных конструкций / А.С. Кавелин, А.Д. Тютин, В.Э. Нуриев [и др.] // Инженерный вестник Дона. — 2019. — № 8 (59). — URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2019/6156> (дата обращения: 15.03.2026)
2. Рогожина А.В. Расчёт деформативности CLT-панели перекрытия / А.В. Рогожина // Инженерный вестник Дона. — 2022. — № 6. — URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2022/7690> (дата обращения: 15.03.2026)
3. Fiorelli J. Analysis of the strength and stiffness of timber beams reinforced with carbon fiber and glass fiber / J. Fiorelli, A.A. Dias // Materials Research. — 2003. — Vol. 6, No. 2. — P. 193–202. — DOI: 10.1590/S1516-14392003000200014
4. Borri A. A method for flexural reinforcement of old wood beams with CFRP materials / A. Borri, M. Corradi, A. Grazini // Composites Part B: Engineering. — 2005. — Vol. 36, No. 2. — P. 143–153. — DOI: 10.1016/j.compositesb.2004.04.013
5. Raftery G.M. Low-grade glued laminated timber reinforced with FRP plate / G.M. Raftery, A.M. Harte // Composites Part B: Engineering. — 2011. — Vol. 42, No. 4. — P. 724–735. — DOI: 10.1016/j.compositesb.2011.01.029
6. Schober K.-U. FRP reinforcement of timber structures / K.-U. Schober, A.M. Harte, R. Kliger [et al.] // Construction and Building Materials. — 2015. — Vol. 97. — P. 106–118. — DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.06.020
7. Бусаргин Д.А. Характер разрушения древесины при сжатии / Д.А. Бусаргин, А.Л. Лазарев, П.Н. Осина [и др.] // Оригинальные исследования. — 2023. — Т. 13, № 7. — С. 135–140
8. Селяев В.П. Анализ диаграмм деформирования древесины при нагружении вдоль и поперек волокон / В.П. Селяев, И.В. Архипов, А.Л. Лазарев // Эксперт: теория и практика. — 2026. — 2 (33). — С. 132–137. — DOI: 10.51608/26867818_2026_2_132
9. Хухрянский П.Н. Прочность древесины / П.Н. Хухрянский. — Москва: Гослесбумиздат, 1955. — 172 с.
10. Уголев Б.Н. Древесиноведение с основами лесного товароведения / Б.Н. Уголев. — Москва: МГУЛ, 2004. — 340 с.
11. ГОСТ 29167-2021. Бетоны. Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. — Введ. 2026-07-28. — Москва: Российский институт стандартизации, 2022. — 22 С.
12. ГОСТ 16483.0-78. Древесина. Общие требования к физико-механическим испытаниям. — Введ. 2026-07-28. — Москва: Изд-во стандартов, 1978. — 6 С.
13. ГОСТ 16483.3-84. Древесина. Метод определения предела прочности при статическом изгибе. — Введ. 2026-07-28. — Москва: Изд-во стандартов, 1985. — 4 С.



14. Тутурин С.В. Механическая прочность древесины dis.. ...Doctor of Sciences: 01.02.04 / С.В. Тутурин. — Тверь. — 300 с.
15. Карлсен Г.Г. Конструкции из дерева и пластмасс / Г.Г. Карлсен, Ю.В. Слицкоухов. — Москва: Стройиздат, 1986. — 543 с.
16. СП 64.13330.2017. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80. — Введ. 2026-07-28. — Москва: Минстрой России, 2017. — 104 С.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Kavelin A.S. Armirovanie derevyannykh konstruktсий [Reinforcement of timber structures] / A.S. Kavelin, A.D. Tyutina, V.E. Nuriev [et al.] // Inzhenernyy vestnik Dona [Engineering Journal of Don]. — 2019. — № 8 (59). — URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2019/6156> (accessed: 15.03.2026) [in Russian]
2. Rogozhina A.V. Raschyot deformativnosti CLT-paneli perekrytiya [Calculation of the deformability of a CLT floor panel] / A.V. Rogozhina // Inzhenernyy vestnik Dona [Engineering Journal of Don]. — 2022. — № 6. — URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2022/7690> (accessed: 15.03.2026) [in Russian]
3. Fiorelli J. Analysis of the strength and stiffness of timber beams reinforced with carbon fiber and glass fiber / J. Fiorelli, A.A. Dias // Materials Research. — 2003. — Vol. 6, No. 2. — P. 193–202. — DOI: 10.1590/S1516-14392003000200014
4. Borri A. A method for flexural reinforcement of old wood beams with CFRP materials / A. Borri, M. Corradi, A. Grazini // Composites Part B: Engineering. — 2005. — Vol. 36, No. 2. — P. 143–153. — DOI: 10.1016/j.compositesb.2004.04.013
5. Raftery G.M. Low-grade glued laminated timber reinforced with FRP plate / G.M. Raftery, A.M. Harte // Composites Part B: Engineering. — 2011. — Vol. 42, No. 4. — P. 724–735. — DOI: 10.1016/j.compositesb.2011.01.029
6. Schober K.-U. FRP reinforcement of timber structures / K.-U. Schober, A.M. Harte, R. Kliger [et al.] // Construction and Building Materials. — 2015. — Vol. 97. — P. 106–118. — DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.06.020
7. Busargin D.A. Kharakter razrusheniya drevesiny pri szhatii [The nature of wood failure under compression] / D.A. Busargin, A.L. Lazarev, P.N. Osina [et al.] // Original'nye issledovaniya [Original Research]. — 2023. — Vol. 13, No. 7. — P. 135–140 [in Russian]
8. Selyaev V.P. Analiz diagramm deformirovaniya drevesiny' pri nagruzhении vdol' i poperek volokon [Analysis of diagrams of wood deformation during loading along and across the fibers] / V.P. Selyaev, I.V. Arxipov, A.L. Lazarev // Expert: theory and practice. — 2026. — 2 (33). — P. 132–137. — DOI: 10.51608/26867818_2026_2_132 [in Russian]
9. Xuxryanskij P.N. Prochnost' drevesiny' [Strength of wood] / P.N. Xuxryanskij. — Moscow: Goslesbumizdat, 1955. — 172 p. [in Russian]
10. Ugolev B.N. Drevesinovedenie s osnovami lesnogo tovarovedeniya [Wood science with fundamentals of forest merchandising] / B.N. Ugolev. — Moscow: MGUL, 2004. — 340 p. [in Russian]
11. GOST 29167-2021. Betony'. Metody' opredeleniya xarakteristik treshhinostojkosti (vyazkosti razrusheniya) pri staticheskom nagruzhении [GOST 29167-2021. Concretes. Methods for determination of fracture toughness characteristics under static loading]. — Introduced 2026-07-28. — Moscow: Rossijskij institut standartizacii, 2022. — 22 P. [in Russian]
12. GOST 16483.0-78. Drevesina. Obshhie trebovaniya k fiziko-mexanicheskim ispy'taniyam [GOST 16483.0-78. Wood. General requirements for physical and mechanical tests]. — Introduced 2026-07-28. — Moscow: Izd-vo standartov, 1978. — 6 P. [in Russian]
13. GOST 16483.3-84. Drevesina. Metod opredeleniya predela prochnosti pri staticheskom izgibe [GOST 16483.3-84. Wood. Method for determination of static bending strength]. — Introduced 2026-07-28. — Moscow: Izd-vo standartov, 1985. — 4 P. [in Russian]
14. Tuturin S.V. Mexanicheskaya prochnost' drevesiny' [Mechanical strength of wood] dis.....of PhD in : 01.02.04 / С.В. Тутурин. — Tver'. — 300 p. [in Russian]
15. Karlsen G.G. Konstrukcii iz dereva i plastmass [Timber and plastic structures] / G.G. Karlsen, Yu.V. Sliczkouhov. — Moscow: Strojizdat, 1986. — 543 p. [in Russian]
16. SP 64.13330.2017. Derevyanny'e konstrukcii. Aktualizirovannaya redakciya SNIП II-25-80 [SP 64.13330.2017. Timber structures. Revised edition of SNIП II-25-80]. — Introduced 2026-07-28. — Moscow: Minstroj Rossii, 2017. — 104 P. [in Russian]