

Научная статья

УДК 674:691.11:694.14

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-6-149-161

## Научное обоснование использования древесины осины в деревянных клееных конструкциях

*А.А. Титунин<sup>1</sup>✉, д-р техн. наук, доц.; ResearcherID: [W-5121-2017](#),*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0953-0898>*

*М.С. Геворкян<sup>2</sup>, аспирант; ResearcherID: [GSD-6751-2022](#),*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5406-2421>*

*А.А. Федотов<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [R-1155-2018](#),*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3668-899X>*

*Т.Н. Вахнина<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [R-1116-2018](#),*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7201-5979>*

*И.В. Сусоева<sup>1</sup>, д-р техн. наук, доц.; ResearcherID: [R-1053-2018](#),*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7295-8934>*

<sup>1</sup>Костромской государственный университет, ул. Дзержинского, д. 17, г. Кострома, Россия, 156007; [a\\_titunin@ksu.edu.ru](mailto:a_titunin@ksu.edu.ru)✉, [aafedotoff@yandex.ru](mailto:aafedotoff@yandex.ru), [t\\_vachnina@mail.ru](mailto:t_vachnina@mail.ru), [i.susoeva@yandex.ru](mailto:i.susoeva@yandex.ru)

<sup>2</sup>Костромская государственная сельскохозяйственная академия, ул. Учебный городок, д. 34, пос. Караваево, Костромской р-н, Костромская обл., Россия, 156530; [gevmeline@inbox.ru](mailto:gevmeline@inbox.ru)

Поступила в редакцию 20.10.22 / Одобрена после рецензирования 03.02.23 / Принята к печати 07.02.23

**Аннотация.** Одним из перспективных материалов для строительства являются деревянные клееные конструкции. Согласно действующим нормативным документам для производства таких конструкций используется, как правило, древесина хвойных пород, запасы которой в промышленно освоенных районах за последние десятилетия значительно снизились. При этом в ряде регионов России есть значительный сырьевой резерв осинового сырья, которая на протяжении многих веков успешно применялась в строительстве зданий и сооружений. Ее физико-механические характеристики отличаются от показателей древесины сосны на 3,2–18,6 %, поэтому она может рассматриваться в качестве альтернативного источника сырьевого обеспечения предприятий деревянного домостроения. Для оценки степени влияния сочетания хвойной и осинового сырья на прочность клееного соединения как одного из основных показателей качества деревянных клееных конструкций выполнен комплекс теоретических и экспериментальных исследований. Расчетным путем определены максимальные касательные и нормальные напряжения клееного шва в заготовках из сосны и осины, которые существенно выше показателей цельной древесины. Значения прочности при скалывании в склеенных ламелях из сосны и осины (4,46–8,06 МПа), полученные в ходе проведения опытов на 1-м этапе исследований, оказались близки к прочности цельной древесины. На 2-м этапе был использован метод дисперсионного анализа, результаты подтвердили предположение о том, что при склеивании ламелей толщиной до 20 мм разница в прочности клееного шва конструкций из сосны и конструкций из сосны и осины незначима. Полученные данные служат основой для дальнейшей работы по диверсификации сырьевых ресурсов при производстве деревянных клееных конструкций за счет вовлечения в переработку маловостребованной древесины осины.

© Титунин А.А., Геворкян М.С., Федотов А.А., Вахнина Т.Н., Сусоева И.В., 2023

Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

**Ключевые слова:** клееные конструкции, деревянное домостроение, древесина, хвойные породы, осина, внутренние напряжения, размеры заготовок, прочность клееного шва  
**Благодарности:** Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и администрации Костромской области в рамках научного проекта № 22-29-20267.

**Для цитирования:** Титунин А.А., Геворкян М.С., Федотов А.А., Вахнина Т.Н., Сусоева И.В. Научное обоснование использования древесины осины в деревянных клееных конструкциях // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 6. С. 149–161. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-6-149-161>

Original article

### Scientific Substantiation of Aspen Wood Use in Wooden Glued Structures

**Andrey A. Titunin**<sup>1</sup>✉, Doctor of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [W-5121-2017](https://orcid.org/0000-0002-0953-0898),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0953-0898>

**Meline S. Gevorgyan**<sup>2</sup>, Postgraduate Student; ResearcherID: [GSD-6751-2022](https://orcid.org/0000-0002-5406-2421),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5406-2421>

**Alexander A. Fedotov**<sup>1</sup>, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; [R-1155-2018](https://orcid.org/0000-0002-3668-899X),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3668-899X>

**Tatiana N. Vakhnina**<sup>1</sup>, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;  
ResearcherID: [R-1116-2018](https://orcid.org/0000-0002-7201-5979), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7201-5979>

**Irina V. Susoeva**<sup>1</sup>, Doctor of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [R-1053-2018](https://orcid.org/0000-0002-7295-8934),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7295-8934>

<sup>1</sup>Kostroma State University, ul. Dzerzhinskogo, 17, Kostroma, 156007, Russian Federation; titunin62@mail.ru✉, aafedotoff@yandex.ru, t\_vakhnina@mail.ru, i.susoeva@yandex.ru

<sup>2</sup>Kostroma State Agricultural Academy, ul. Uchebnyj gorodok, 34, Karavaevo village, Kostroma, 156530, Russian Federation; gevmeline@inbox.ru

Received on October 20, 2022 / Approved after reviewing on February 3, 2023 / Accepted on February 7, 2023

**Abstract.** One of the promising materials for construction are wooden glued structures. According to the current regulatory documents, for the production of such structures coniferous wood is usually used, the reserves of which in industrially developed areas have significantly decreased over the last decades. At the same time, in a number of regions of Russia there is a significant raw material reserve of aspen wood, which has been successfully used in the construction of buildings and structures for many centuries. Its physical and mechanical characteristics differ from pine wood from 3.2 to 18.6 %. Therefore, it can be considered as an alternative source of raw materials for wooden house construction enterprises. To assess the degree influence of the combination of coniferous and aspen wood on the strength of the glue joint, as one of the main indicators of the quality of wooden glued structures, a set of theoretical and experimental studies was carried out. Maximum tangential and normal stresses of glue joint in pine and aspen blanks, which are significantly higher than those of solid wood, were determined by calculation. The values of shear strength in glued pine and aspen lamellas (4.46–8.06 MPa), obtained during the experiments at the 1st stage of research, were close to the strength of solid wood. At the 2nd stage the method of dispersion analysis was used, the results confirmed the assumption that when gluing lamellas up to 20 mm thick, the difference



in the strength of the glue joint of structures made of pine and structures made of pine and aspen is insignificant. The obtained data serve as a basis for further work on diversification of raw material resources in the production of wooden glued structures due to the involvement of low-demand aspen wood in processing.

**Keywords:** glued structures, wooden house construction, wood, coniferous species, aspen, internal stresses, dimensions of blanks, glue joint strength

**Acknowledgements:** Research was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation and the administration of the Kostroma region within the framework of scientific project No. 22-29-20267.

**For citation:** Titunin A.A., Gevorgyan M.S., Fedotov A.A., Vakhnina T.N., Susoeva I.V. Scientific Substantiation of Aspen Wood Use in Wooden Glued Structures. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2023, no. 6, pp. 149–161. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-6-149-161>

### *Введение*

Для деревянного домостроения России важным направлением является совершенствование технологий производства материалов и конструкций на основе древесины. Решение этой задачи, как отмечается в Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 г., утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 11.02.2021 г., будет способствовать ускоренному росту деревянного домостроения и всего лесопромышленного комплекса страны.

Возможности использования древесины в строительстве значительно расширены благодаря технологии изготовления деревянных клееных конструкций (ДКК) и клееного бруса. Для различных вариантов ДКК характерна некоторая общность – при их изготовлении нет необходимости применять только высококачественное сырье [19]. Поэтому использование многослойных клееных конструкций позволяет снизить расход качественных крупноразмерных пиловочных бревен в деревянном домостроении [9, 11, 14, 19–21].

Для производства деревянных клееных конструкций по требованиям ГОСТ 20850–2014 «Конструкции деревянные клееные несущие. Общие технические условия» используется древесина хвойных пород, запасы которой вблизи центров промышленной переработки за последнее время уменьшились [10, 21]. При этом есть значительное количество осинового сырья. Например, в Костромской области осинового сырья занимают около 10 % лесопокрытых земель [3], а по России ресурсы данного вида оцениваются в 2,6 млрд м<sup>3</sup>. Применение для производства ДКК не только сосны и ели, но и других пород не противоречит требованиям ГОСТ 20850–2014, который допускает возможность использования различных пород при условии представления в документации информации о физико-механических характеристиках материала древесины и при достаточной прочности и долговечности ДКК.

Обеспечение прочности ДКК – проблема, над решением которой трудятся многие российские и зарубежные ученые. Вопросы анизотропных свойств конструкционных материалов из древесины, оценки их длительной прочности, упругих постоянных древесины, влияния технологических факторов на

стойкость клееных соединений древесины к циклическим температурно-влажностным воздействиям, конструирования и расчета элементов строительных конструкций рассматривались в исследованиях Уголева Б.Н., Ашкенази Е.К., Глухих В.Н., Хрулева В.М., Ковальчука Л.М., Чубинского А.Н., Серова Е.Н., Турковского С.Б., Погорельцева А.А., Федосова С.В., Лабудина Б.В., Черных А.Г., Тамби А.А., Волынского В.Н., Рыкунина С.Н., Гороховского А.Г., Котлова В.Г. и др. Проблемами использования осины в ДКК занимались Куликов В.А., Чубов А.Б., Кожемякина Н.П., Усачева В.Л., Титунин А.А. Анализ работ этих и других авторов показал, что в ряде исследований экспериментальные данные неоднозначны и трудно поддаются интерпретации [25]. Некоторые исследователи для исключения негативного влияния ползучести древесины на прочность ДКК предлагают использовать армирование конструкций стекловолокном и другими материалами [18, 31, 33]. Однако увеличение затрат и усложнение технологии обеспечивают рост прочности только на 14–17 %, а снижение деформируемости – на 4–7 %. Такие значения могут быть сопоставимы с экспериментальным рассеянием результатов, обусловленным вариативностью показателей древесины. Более надежным является внешнее армирование, повышающее прочность в 1,8–2,1 раза [12, 29], но при этом не решаются задачи диверсификации и рационального использования древесных ресурсов страны, а разрабатывается практически новый конструкционный композитный материал. Ученые, исследующие эксплуатационные показатели клееной древесины, отмечают, что ее длительные механические характеристики и влияние различных факторов на эксплуатационные показатели ДКК изучены недостаточно [1, 13, 15, 27].

На кафедре лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств Костромского государственного университета много лет ведется оценка возможности использования осины для производства клееной древесины с необходимым комплексом физико-механических показателей. Научная проблема, на решение которой направлено исследование, – покрытие дефицита высококачественной древесины для нужд деревянного домостроения путем вовлечения в хозяйственный оборот маловостребованной осиновой древесины при использовании ее в производстве многослойных деревянных конструкций. Общеизвестным является утверждение, что на внутренние напряжения в клееной древесине влияют размеры склеиваемых ламелей, расположение и ширина годичных слоев, доля поздней древесины и другие особенности макростроения древесины [2, 21]. При этом напряженное состояние в реальных деревянных конструкциях значительно сложнее, чем используемые для характеристики прочности клеевых соединений схемы испытаний [26].

Цель представленного исследования – на основе анализа отечественного и зарубежного опыта оценить степень влияния сочетания хвойной и осиновой древесины на прочность клеевого соединения.

#### *Объекты и методы исследования*

Объектом исследования являлись показатели качества клеевых соединений в 2- и 3-слойных конструкциях из ламелей сосны и осины, при скле-

ивании которых рассматривались 2 варианта направления годичных слоев в смежных ламелях: с расположением сердцевины от клевого шва и к клеевому шву [26].

Как отмечают Глухих В.Н. с соавт., не существует полных исследований влияния начальных напряжений, сформировавшихся в процессе роста дерева, на прочность пиломатериалов и клееных балок [6]. Поэтому прогнозирование процесса формирования внутренних напряжений имеет большой научный и практический интерес. При этом использование в ДКК менее распространенных пород обосновано путем моделирования конструкции методом конечных элементов [30]. Традиционным методом планирования эксперимента и обработки его результатов, кроме метода конечных элементов [9, 24], является метод определения прочности при статическом изгибе, позволяющий прогнозировать длительную прочность по результатам кратковременных испытаний [8]. Используются метод аппроксимации экспериментальных зависимостей показателей различными функциями [17], математическое моделирование с применением программного обеспечения [28], разработка математических моделей с помощью классических планов эксперимента [7].

На 1-м этапе исследования для обоснования возможности применения при склеивании древесины разных пород в 2-слойных конструкциях с использованием общеизвестных зависимостей был выполнен расчет максимальных касательного и нормального напряжений в клеевом шве, соответствующих напряженному состоянию сдвига и отрыва в натуральных конструкциях [26]. Осуществлена экспериментальная проверка качества клеевых соединений в конструкциях из сосны (контрольные образцы) и из сосны и осины (опытные образцы). Для проведения опытов образцы изготавливались согласно ГОСТ 20850–14 из заготовок сечением  $20 \times 100$  мм и длиной 2,0 м. Для склеивания применялся 2-компонентный меламино-мочевинно-формальдегидный клей при норме расхода 400 (1-стороннее нанесение) и 240 (2-стороннее нанесение) г/м<sup>2</sup>. После нанесения клея заготовки выдерживались в течение 4 ч в прессе при давлении 1 МПа, продолжительность доотверждения связующего – 5 дн.

На 2-м этапе эксперимента для оценки влияния сочетания древесных пород в ДКК на качество клевого соединения склеивались 3-слойные конструкции из ламелей. Сечение ламелей –  $20 \times 100$  мм, длина – 2,0 м. Условия склеивания аналогичны 1-й серии опытов.

Значимость влияния фактора «сочетание пород в ДКК» (фактор *A*) оценивалась с использованием однофакторного дисперсионного анализа. По критерию Фишера проверялась однородность дисперсии фактора *A* и остаточной дисперсии, характеризующей среднее рассеяние значений показателей в эксперименте.

#### *Результаты исследования и их обсуждение*

Результаты расчетов внутренних напряжений в клеевом шве 2-слойных конструкций, склеенных из сосны и из сосны с осинкой, представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Моделирование напряженного состояния в клеевом шве при скалывании**  
**Modeling of the stress state in the glued joint during shearing**

Характер напряженного состояния	Максимальное напряжение в клеевом шве	Расчетная формула	Расчетное напряжение в клеевом шве, МПа	
			«сосна–сосна»	«сосна–осина»
Сдвиг	Касательное, $\tau_{\max}$	$\tau_{\max} = \tau_{\text{ср}} a_{\text{к}} l \frac{1}{\text{Tg} \frac{a_{\text{к}} l}{2}};$ $a_{\text{к}}^2 = \frac{G_3}{E_2 h_2 h_3} \left( 1 + \frac{E_2 h_2}{E_1 h_1} \right)$	71,4	46,3
Отрыв	Нормальное, $\sigma_{\max}$	$\sigma_{\max} = 2Q_0 a_{\text{н}};$ $a_{\text{н}} = \frac{1}{2} \sqrt[4]{\frac{8E_3}{h_3 D}};$ $D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu)^2}$	19,2	17,7

Примечание:  $\tau_{\text{ср}}$  – средняя прочность при скалывании древесины вдоль волокон, МПа;  $a_{\text{к}}$  и  $a_{\text{н}}$  – коэффициенты прочностных свойств клея и склеиваемых материалов;  $l$  – длина клевого шва, м;  $G_3$  – модуль сдвига клея, МПа;  $E_1, E_2, E_3$  – модули упругости склеиваемых материалов и клея, МПа;  $h_1, h_2, h_3$  – толщины склеиваемых материалов и клевого шва, м;  $Q_0$  – разрушающая нагрузка, Н;  $D$  – цилиндрическая жесткость, Нм;  $\mu$  – коэффициент Пуассона для древесины.

Как видно из представленных результатов, при склеивании ламелей из сосны и осины максимальные касательные напряжения (46,3 МПа) ниже, чем при склеивании только сосновых ламелей (71,4 МПа). Разница расчетных нормальных напряжений в клеевом шве при склеивании ламелей из осины и сосны и только из сосны не так существенна – напряжения соответственно равны 17,7 и 19,2 МПа. Полученные расчетные значения в обоих случаях оказались выше предела прочности при скалывании вдоль волокон и при растяжении поперек волокон в случае сосны и осины. На основании этого было сделано предположение, что при испытаниях опытных образцов в лабораторных условиях их разрушение будет происходить по древесине, а не по клеевому шву. То есть прочность клееной конструкции в большей степени определяется прочностью древесины, а не прочностью клевого шва.

По ряду физико-механических свойств древесина осины и сосны имеет близкие значения. Так, например, коэффициент тангенциального разбухания осины на 3,23 % ниже, чем у сосны; модуль упругости при изгибе – на 8,2 %. Различием в строении древесины этих двух пород объясняется разница предела прочности при скалывании вдоль волокон: если у сосны эти значения в радиальной и тангенциальной плоскостях соответственно равны 7,44 и 7,23 МПа, то у осины – 6,15 и 8,42 МПа. Подтверждением гипотезы о возможности обеспечения требуемой прочности клевого шва при небольшой разнице в усушке и разбухании древесины разных пород являются также результаты иссле-

дований по склеиванию осинового тонкослойной древесины при производстве фанеры, выполненных Онегиным В.И. и Чубинским А.Н. [16].

Полученные в ходе исследований результаты позволили предположить, что для снижения разницы в усушке–разбухании смежных слоев осины и сосны при изменении влажности древесины в процессе эксплуатации ДКК предпочтительнее использовать осиновые ламели во внутренних слоях деревянных конструкций. С учетом повышения стойкости осинового материала к воздействию внешней среды в процессе эксплуатации определенный интерес представляет также возможность применения качественной древесины осины в наружных слоях клееных конструкций при соблюдении требований к прочности клеевого соединения и стойкости к воздействию влаги.

Средние арифметические значения результатов определения прочности образцов при скалывании и расслоении клеевых швов, полученные на 1-м этапе экспериментальных исследований [21, 26], представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Результаты экспериментального определения прочности клеевого шва**  
**Experimental results of glued joint strength determination**

Направление годовичных слоев в смежных ламелях (положение сердцевины)	Способ нанесения клея	Предел прочности при скалывании вдоль волокон, МПа		Расслаивание клеевых швов, %	
		контрольный образец	опытный образец	контрольный образец	опытный образец
От клеевого шва	1-стороннее	6,19	4,01	2,58	4,25
К клеевому шву		5,48	3,15	4,26	6,68
От клеевого шва	2-стороннее	8,06	6,14	0,35	0,69
К клеевому шву		6,92	4,46	1,63	3,87

Полученные результаты выявили, что прочность клеевого шва в конструкциях, склеенных из сосны и осины, больше, чем пределы прочности этих пород. О влиянии расположения годовичных слоев в смежных склеиваемых ламелях на прочность ДКК сказано и в работе В.Р. Vital et al. [34].

Для оценки значимости влияния фактора  $A$  на прочность клеевого соединения в ДКК на 2-м этапе экспериментальных исследований был использован метод однофакторного дисперсионного анализа. Фактор  $A$  варьировался на  $i$  уровнях ( $i = 1...3$ ):  $a_1$  – клееный образец «сосна–сосна»;  $a_2$  – «осина–осина»;  $a_3$  – «осина–сосна». Количество дублированных опытов при определении прочности образцов при скалывании в каждой точке плана (на каждом уровне фактора  $A$ )  $j = 20$ . Уровни фактора  $A$ , результаты определения прочности клееных образцов при скалывании и статистические параметры представлены в табл. 3.

Общее среднее в эксперименте  $\bar{Y} = 6,15$  МПа. Проверка однородности дисперсий  $S_j^2$  выполнена по критерию Кохрена. Расчетное значение критерия Кохрена – 0,405; табличное, определенное на уровне значимости 0,05 при числе степеней свободы в каждой точке экспериментального плана  $20 - 1 = 19$ , равняется 0,538. Расчетное значение меньше табличного, следовательно, проверка подтвердила однородность дисперсий выборок.

Таблица 3

**Прочность клееной древесины при скальвании  
и статистические параметры фактора *A***  
**Shear strength of glued laminated wood and statistical parameters of factor *A***

Фактор <i>A</i>	Значения выходной величины $Y_{ij}$ , МПа	Среднее арифметическое уровня $\bar{Y}_i$ , МПа	Дисперсия уровня $S_i^2$
Сосна–сосна	7,97; 5,93; 8,36; 7,33; 6,88; 6,98; 6,11; 6,93; 6,66; 6,13; 6,51; 7,54; 7,63; 5,30; 5,35; 5,92; 5,37; 5,90; 5,26; 6,05	6,51	0,859
Осина–осина	8,39; 4,36; 5,24; 7,14; 5,01; 5,49; 5,06; 6,31; 5,56; 6,47; 6,65; 5,31; 4,12; 8,27; 4,15; 5,98; 7,32; 4,00; 5,59; 5,85	5,81	1,641

Дисперсия фактора *A* – 2,461; остаточная дисперсия (средняя в эксперименте)  $S_n^2 = 1,350$ . Проверка однородности дисперсии фактора *A* и остаточной дисперсии выполнена по критерию Фишера. Расчетное значение критерия –  $2,461/1,350 = 1,823$ ; табличное, при уровне значимости 0,05 и числе степеней свободы для фактора *A* – 2, для остаточной дисперсии –  $3(20 - 1) = 57$ , равно 3,17. Расчетное значение критерия Фишера меньше табличного, следовательно, влияние фактора *A* на прочность при скальвании по клеевому шву незначимо (при данных уровнях).

Оценка значимости различий между прочностью при скальвании образцов, полученных при разных схемах сборки клееного материала, выполнена по критерию Стьюдента. Для этого попарно проверена однородность средних арифметических  $\bar{Y}_i$  прочности клееных образцов разной схемы склеивания. Расчетное значение критерия Стьюдента определялось по формуле

$$t_p = \frac{|\bar{Y}_1 - \bar{Y}_2|}{\sqrt{\frac{(S_1^2 + S_2^2)}{n}}}$$

Табличное значение критерия Стьюдента ( $t_t$ ) устанавливалось по уровню значимости и числу степеней свободы: при уровне значимости 0,05 и числе степеней свободы  $2n - 2 = 38$   $t_t = 2,024$ . Результаты проверки значимости различий представлены в табл. 4.

Таблица 4

**Значимость различий прочности клееных образцов**  
**Significance of differences in strength of glued specimens**

Сравниваемые схемы склеивания	Расчетный критерий Стьюдента	Значимость различий
«Сосна–сосна» – «сосна–осина»	1,124	$t_p < t_t$
«Сосна–сосна» – «осина–осина»	1,977	



Поскольку для всех схем склеивания при проверке значимости различий средних арифметических прочности образцов при скалывании расчетный критерий Стьюдента меньше табличного, то различия между уровнями фактора  $A$  незначимы. Однако следует отметить, что при сравнении схем сборки материала «сосна–сосна» и «осина–осина» расчетный критерий Стьюдента довольно близок к критическому  $t_{\alpha} = 2,024$ .

Описанные результаты достигнуты, скорее всего, потому, что древесина сосны и осины имеет близкие значения линейного и объемного разбухания. Поэтому в приграничном слое и в самом клеевом шве внутренние напряжения не превышают предела прочности и не приводят к разрушению клееной конструкции.

Значения прочности клеевого соединения, приведенные в данной статье, достаточно хорошо согласуются с результатами исследований по склеиванию осинового шпона при производстве фанеры, выполненных Онегиным В.И. и Чубинским А.Н. [16]. Ими получена требуемая прочность клеевого шва фанеры из шпона толщиной до 3 мм. В нашем исследовании толщина склеиваемого материала была увеличена до 20 мм. Тем не менее можно утверждать, что условия адгезионного взаимодействия клея и древесины в экспериментах со склеиванием шпона и ламелей сопоставимы.

Разброс значений прочности при скалывании по клеевому шву образцов клееной древесины объясняется влиянием ряда факторов процесса склеивания материала. Так, Серов Е.Н. и Лабудин Б.В. в своих работах отмечали, что клееной древесине свойственна повышенная анизотропия. Увеличение прочности древесины вдоль волокон вследствие повышения ее однородности и снижения количества дефектов клееной древесины сопровождается уменьшением прочности поперек волокон из-за наличия кососрезных волокон в каждом слое и склеивания ламелей по этим скосам, а в зоне сучков – практически по торцам перерезанных волокон [20]. Положительное воздействие длины сращиваемых ламелей на прочность ДКК указывают и другие исследователи. В частности, в работе Чубинского А.Н. с соавт. отмечается, что прочность при статическом изгибе образцов с шипованным зубчатым соединением возрастает с увеличением длины сращиваемых ламелей. Ламели длиной более 200 мм обеспечивают прочность заготовок, соответствующую требованиям российских стандартов [32].

Другой причиной разброса полученных экспериментальных значений прочности склеенных образцов при скалывании могут быть внутренние напряжения, существующие в нативной древесине до склеивания [5] и формируемые в процессе склеивания ламелей древесины [23].

Как видно из работ российских исследователей, способом повышения прочности клееных конструкций из сосновых и осиновых ламелей является уплотнение древесины перед склеиванием [4, 14, 22]. При этом в процессе уплотнения часто наблюдается разрушение древесных элементов [22], что нежелательно.

#### *Заключение*

Полученные в ходе экспериментальных исследований значения прочности клеевого соединения ламелей из древесины сосны и осины (6,12 МПа)

оказались несколько ниже, чем только из сосны (6,51 МПа), однако они соответствуют ГОСТ 20850–2014. Также показатели близки ранее полученным результатам. При этом отмечается общая закономерность повышения прочности клевого соединения при склеивании ламелей только хвойных пород и незначительное снижение прочности при использовании древесины разных пород.

Подтверждена справедливость выдвинутой гипотезы о возможности склеивания ламелей из древесины разных пород при условии незначимости различий в физико-механических свойствах исходного сырья. С практической точки зрения представляет интерес оценка возможности применения ламелей толщиной до 40 мм, что предполагает проведение отдельного комплекса исследований.

С использованием метода дисперсионного анализа доказано, что прочность клевого шва в клееных конструкциях из древесины осины, а также сосны и осины – отличаются незначимо. В совокупности результаты исследований служат основой для дальнейшей работы по диверсификации сырьевых ресурсов в производстве деревянных клееных конструкций за счет вовлечения в переработку маловостребованной древесины осины, что является актуальным для ряда регионов России.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Антипов Д.В. Прочность и деформативность клеедеревянной балки с учетом времени, влажности и температуры эксплуатации: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 2010. 18 с.

Antipov D.V. *Strength and Deformability of a Glued-Wood Beam, Considering Time, Humidity and Operating Temperature*: Cand. Tech. Sci. Diss. Abs. Voronezh, 2010. 18 p. (In Russ.).

2. Ашкенази Е.К. Анизотропия древесины и древесных материалов. М.: Лесн. пром-сть, 1978. 224 с.

Ashkenazi E.K. *Anisotropy of Wood and Wood Materials*. Moscow, Lesnaya promyshlennost, Publ., 1978. 224 p. (In Russ.).

3. Багаев С.С., Багаев Е.С., Дудин В.А. Об оставлении на корню перестойной осины при проведении сплошных рубок в смешанных древостоях // Лесхоз. информ.: электрон. сетевой журн. 2016. № 3. С. 107–114. Режим доступа: <http://lhi.vniilm.ru/index.php/ru/bagaev-s-s-bagaev-e-s-dudin-v-a-ob-ostavlenii-na-kornyu-perestojnoj-osiny-pri-provedenii-sploshnykh-rubok-v-smeshannykh-drevostoyakh> (дата обращения: 24.10.23).

Bagaev S.S., Bagaev E.S., Dudin V.A. On Leaving Overmature Aspen at the Root During Clear-Cutting in Mixed Stands. *Lesohozyaistvennaya informaciya: elektronii setevoi jurnal* = Forestry information: electronic online journal, 2016, no. 3, pp. 107–114. (In Russ.).

4. Борисов А.Ю. Совершенствование технологии переработки древесины осины в кровельный материал с учетом природных и производственных условий: дис. ... канд. техн. наук. Петрозаводск, 2017. 153 с.

Borisov A.Yu. *Improving the Technology of Processing Aspen Wood into Roofing Material, Considering Natural and Production Conditions*: Cand. Tech. Sci. Diss. Petrozavodsk, 2017. 153 p. (In Russ.).

5. Глухих В.Н., Кирютина С.Е., Богданова А.С. Влияние начальных напряжений в древесине на прочность и формоустойчивость деревянных конструкций // Изв. ПГУБС. 2017. № 3. С. 523–531.

Glukhikh V.N., Kiryutina S.E., Bogdanova A.S. The Influence of Primary Stress in Wood on Stiffness and Shape Retention of Timber Constructions. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putei soobscheniya* = Proceedings of Petersburg Transport University, 2017, no. 3, pp. 523–531. (In Russ.).

6. Глухих В.Н., Черных А.Г., Данилов Е.В. Деревянные конструкции с применением когтевых шайб и учетом начальных напряжений древесины: моногр. СПб., 2018. 284 с.

Glukhikh V.N., Chernykh A.G., Danilov E.V. *Wooden Structures Using Claw Washers and Taking Into Account the Initial Stresses of Wood*. Saint Petersburg, 2018. 284 p. (In Russ.).

7. Ерошкина Н.А., Коровкин М.О. Влияние параметров процесса склеивания древесины на прочность клеевого соединения // Системы. Методы. Технологии. 2018. № 3(39). С. 149–153.

Eroshkina N.A., Korovkin M.O. Influence of Wood Gluing Process Parameters on Glue Bond Strength. *Sistemi. Metodi. Tehnologii = Systems. Methods. Technologies*, 2018, vol. 3, iss. 39, pp. 149–153. (In Russ.). <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2018-3-149-153>

8. Иванов Ю.М., Славик Ю.Ю. Оценка длительной прочности древесины при изгибе по результатам кратковременных испытаний // Изв. вузов. Лесн. журн. 1981. № 2. С. 66–70.

Ivanov Yu.M., Slavik Yu.Yu. Evaluation of the Long-Term Strength of Wood in Bending According to the Results of Short-Term Tests. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 1981, no. 2, pp. 66–70. (In Russ.).

9. Кирюткина С.Е. Совершенствование технологии и повышение эксплуатационной надежности деревянных стеновых конструкций из клееного бруса: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2018. 19 с.

Kiryutina S.E. *Improving the Technology and Increasing the Operational Reliability of Wooden Wall Structures Made of Glued Laminated Timber*: Cand. Tech. Sci. Diss. Abs. Saint Petersburg, 2018. 19 p. (In Russ.).

10. Кузнецова Н.Ф., Сауткина М.Ю. Состояние лесов и динамика их породного состава в Центральном федеральном округе // Лесхоз. информ.: электрон. сетевой журн. 2019. № 2. С. 25–45. Режим доступа: [http://lhi.vniilm.ru/PDF/2019/2/LHI\\_2019\\_02-03-Kuznecova.pdf](http://lhi.vniilm.ru/PDF/2019/2/LHI_2019_02-03-Kuznecova.pdf) (дата обращения: 24.10.23).

Kuznetsova N.F., Sautkina M.Yu. Forest State and Dynamics of their Species Composition in the Central Federal District. *Leshozoyaistvennaya informatsiya: elektronnyy setevoy jurnal = Forestry information: electronic online journal*, 2019, no. 2, pp. 25–45. (In Russ.).

11. Леонович О.К., Судникович С.П. Исследование прочностных и теплофизических свойств деревянных строительных конструкций // Тр. БГТУ. № 2. Лесн. и деревооб. пром-сть. 2013. № 2(158). С. 135–137.

Leonovich O.K., Sudnikovich S.P. Study of Strength, and Thermal Properties of Wooden Building Structures. *Proceedings of BSTU*, 2013, vol. 2, iss.158, pp. 135–137. (In Russ.).

12. Линьков Н.В. К вопросу о методике определения прочностных характеристик клеевых соединений деревянных конструкций // Изв. высш. учебн. заведений. Технология текстил. пром-сти. 2021. № 3(393). С. 153–158.

Linkov N.V. To the Question of the Method for Determining the Strength Characteristics of Adhesive Joints of Wooden Structures. *Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti = Textile Industry Technology*, 2021, vol. 3, iss. 393, pp. 153–158. (In Russ.). [https://doi.org/10.47367/0021-3497\\_2021\\_3\\_153](https://doi.org/10.47367/0021-3497_2021_3_153)

13. Мазаник Н.В., Божелко И.К. Эксплуатационные характеристики клеев для составных деревянных конструкций // Тр. БГТУ. № 2. Лесн. и деревооб. пром-сть. 2016. № 2(184). С. 136–139.

Mazanik N.V., Bozhelko I.K. Operating Characteristics of Glues Intended for Combined Wooden Structures. *Proceedings of BSTU*, 2016, vol. 2, iss. 184, pp. 136–139. (In Russ.).

14. Мелехов В.И., Рудная Н.С. Влияние микрорельефа сопрягаемых поверхностей древесины на прочность склеивания // Изв. вузов. Лесн. журн. 2014. № 6. С. 89–100.

Melekhov V.I., Rudnaya N.S. The Influence of Wood Surface Microrelief on the Bond Quality. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2014, no. 6, pp. 89–100. (In Russ.).

15. Овсянников С.И., Шаповалов Д.Ю. Повышение прочности клеевых соединений деревянных конструкций // Вестн. науки и образования Сев.-Зап. России. 2018. Т. 4, № 4. С. 36–41.

Ovsyannikov S.I., Shapovalov D.Yu. Increase in Durability of Glue Connections of Wooden Designs. *Vestnik nauki i obrazovaniya Severo-Zapada Rossii* = Journal of Science and Education of North-West Russia, 2018, vol. 4, no. 4, pp. 36–41. (In Russ.).

16. Онегин В.И., Чубинский А.Н. Промышленное использование древесины осины – эффективное направление устойчивого управления лесами // Зап. Горн. ин-та. 2001. Т. 149. С. 225–227.

Onegin V.I., Chubinskii A.N. Industrial Use of Aspen Wood is an Effective Direction for Sustainable Forest Management. *Zapiski Gornogo instituta* = Journal of Mining Institute, 2001, vol. 149, pp. 225–227. (In Russ.).

17. Попов В.М., Иванов А.В., Латынин А.В., Посметьев В.В. Моделирование процесса формирования внутренних напряжений в клеевых прослойках клееной древесины при воздействии постоянным магнитным полем // Лесотехн. журн. 2011. № 4. С. 47–51.

Popov V.M., Ivanov A.V., Latynin A.V., Posmetiev V.V. Modeling the Process of Formation of Internal Stresses in the Adhesive Interlayers of Glued Wood Under the Influence of a Constant Magnetic Field. *Lesotekhnicheskii jurnal* = Forest Engineering Journal, 2011, no. 4, pp. 47–51. (In Russ.).

18. Рощина С.И. Армирование – эффективное средство повышения надежности и долговечности деревянных конструкций // Изв. вузов. Лесн. журн. 2008. № 2. С. 71–74.

Roshchina S.I. Reinforcement – Efficient Means of Increasing Reliability and Durability of Wooden Structures. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2008, no. 2, pp. 71–74. (In Russ.).

19. Рыкунин С.Н., Кривошечков Н.В. Влияние изменения параметров сосновых пиломатериалов на формирование качества стенового клееного бруса // Лесн. вестн. / Forestry Bulletin. 2017. Т. 21, № 6. С. 50–53.

Rykunin S.N., Krivoshechekov N.V. The Influence of Changing the Parameters of Pine Lumber on the Formation of the Quality of Glued Wall Beams. *Lesnoi vestnik* = Forestry Bulletin, 2017, vol. 21, no. 6, pp. 50–53. (In Russ.).

20. Серов Е.Н., Лабудин Б.В. Клееные деревянные конструкции: состояние и проблемы развития // Изв. вузов. Лесн. журн. 2013. № 2. С. 137–146.

Serov E.N., Labudin B.V. Glued Timbering: Present State and Development Problems. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2013, no. 2, pp. 137–146. (In Russ.).

21. Титунин А.А. Научные основы получения конкурентоспособных строительных материалов из низкосортной древесины и древесных отходов: дис. ... д-ра техн. наук. Иваново, 2011. 442 с.

Titunin A.A. *Scientific Bases for Obtaining Competitive Building Materials from Low-Grade Wood and Wood Waste*: Doc. Tech. Sci. Diss. Ivanovo, 2011. 442 p. (In Russ.).

22. Усачева В.Л. Формирование клееных материалов из уплотненной древесины осины: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2006. 193 с.

Usacheva V.L. *Formation of Glued Materials from Compacted Aspen Wood*: Cand. Tech. Sci. Diss. Saint Petersburg, 2006. 193 p. (In Russ.).

23. Фрейдин А.С., Вуба К.Т. Прогнозирование свойств клеевых соединений древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1980. 223 с.

Freidin A.S., Vuba K.T. *Forecasting the Properties of Adhesive Joints of Wood*. Moscow, Lesnaya promyshlennost Publ., 1980. 223 p. (In Russ.).

24. Циулин Е.Ю., Шмидт А.Б. Численное моделирование модуля упругости LVL с различным сочетанием взаимно перпендикулярных слоев шпона // Изв. вузов. Лесн. журн. 2018. № 6. С. 138–148.

Tsiulin E.Yu., Shmidt A.B. Numerical Simulation of LVL Elastic Modulus with Different Combinations of Mutually Perpendicular Veneer Layers. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2018, no. 6, pp. 138–148. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2018.6.138>

25. Шаронов Е.С., Королев А.С., Хисамеева А.Р. Исследование влияния термической обработки древесины сосны (*Pinus sylvestris*) на качество клеевых соединений в клееных деревянных конструкциях // Вестн. КНИТУ. 2014. Т. 17, № 5. С. 38–41.

Sharapov E.S., Korolev A.S., Hisameeva A.R. Study of the Influence of Heat Treatment of Pine Wood (*Pinus sylvestris*) on the Quality of Adhesive Joints in Glued Wooden Structures. *Vestnik kazanskogo tehnologicheskogo universiteta* = Bulletin of Kazan Technological University, 2014, vol. 17, no. 5, pp. 38–41. (In Russ.).

26. Шереметьева Т.В., Титунин А.А. Обоснование использования осины в производстве деревянных клееных конструкций // Лесн. вестн. 2008. № 6. С. 63–67.

Sheremetyeva T.V., Titunin A.A. Rationale for the Use of Aspen in the Production of Glued Wooden Structures. *Lesnoi vestnik* = Forestry Bulletin, 2008, no. 6, pp. 63–67. (In Russ.).

27. Ярцев В.П., Антипов Д.В. Прочность и долговечность клеедеревянных балок с учетом влажности, температуры и времени эксплуатации // Вестн. ТГТУ. 2011. Т. 17, № 3. С. 780–789.

Yartsev V.P., Antipov D.V. Strength and Durability of Laminated Glued Timbers with Allowance for Humidity, Temperature, and In-Service Time. *Vestnik TSTU* = Bulletin of TSTU, 2011, vol. 17, no. 3, pp. 780–789. (In Russ.).

28. Ariskin M.V., Martyshkin D.O., Vanin I.V. Mathematical Modeling of Stress-Strain State of Elements of Joints of Wooden Structures on Glued Fiberglass Washers. *Journal of Physics, Conference Series*, 2021, vol. 2131, art. 032095. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2131/3/032095>

29. Lukin M.V., Roshchina S.I., Gribanov A.S., Naychuk A.Ya. Stress-strain State of Wooden Beams with External Reinforcement. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 896, art. 012066. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/896/1/012066>

30. Makomra V., Lissouck R.O., Pommier R., Ngoc A.P., Breysse D., Denaud L., Max L., Ohandja A. Analysis of Drying Stresses in Green-Glued Plywood of Bete (*Mansonia altissima*) Specie. *Journal of Wood Science*, 2020, vol. 66, art. 70. <https://doi.org/10.1186/s10086-020-01911-1>

31. Roshchina S., Lukin M., Lisvatnikov M., Koscheev A. The Phenomenon for the Wood Creep in the Reinforced Glued Wooden Structures. *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 245, art. 03020. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201824503020>

32. Rusakov D., Sokolova E., Varankina G., Chubinsky A. Research of Strength of Gluing of Wood. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, vol. 574, art. 012070. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/574/1/012070>

33. Sergeev M., Lukina A., Zdravovic N., Reva D. Stress-strain State of a Wood-glued Three-Span Beam with Layer-By-Layer Modification. *Proceedings of MPCPE*, 2021, vol. 182, pp. 485–491. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-85236-8\\_43](https://doi.org/10.1007/978-3-030-85236-8_43)

34. Vital B.R., Maciel A.S., Della Lucia R.M. Quality of Wood Joints Glued with Wood Veneers from Three Trunk Regions of *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* and *Pinus elliottii*. *Revista Árvore*, 2006, vol. 30, iss. 4, pp. 637–644. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622006000400017>

**Конфликт интересов:** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов  
**Conflict of interest:** The authors declare that there is no conflict of interest

**Вклад авторов:** Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи  
**Authors' Contribution:** All authors contributed equally to the writing of the article