

Е. А. Лосик

Белорусский государственный технологический университет

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ШПОНА ДРЕВЕСИНЫ БЕРЕЗЫ

В статье представлены результаты комплексного экспериментального исследования технологических факторов термомеханической модификации (уплотнения) шпона из древесины березы и их влияние на его физико-механические характеристики. Проанализированы изменения толщины и плотности материала, а также оценены характеристики истираемости и шероховатости уплотненного шпона. Установлено, что оптимальный режим уплотнения достигается при давлении пресса 17 МПа, температуре 80–90 °С и времени выдержки 1 мин, что способствует увеличению плотности шпона на 20% и снижению потери массы при истирании до 5% по сравнению с потерей около 20% у натурального шпона.

Разработанные математические модели, описывающие технологический процесс, подтверждены статистической проверкой с критериями Кохрена и Фишера, что свидетельствует о высокой надежности и стабильности характеристик.

Полученные результаты подчеркивают значительный потенциал уплотненного шпона как конструкционного и декоративного материала, устойчивого к механическим нагрузкам, истиранию и воздействию влаги. Это расширяет область его применения в строительстве, мебельной и отделочной промышленности. Далее рекомендуется продолжить исследование уплотненных древесных материалов для повышения качества продукции и оптимизации технологий обработки.

Ключевые слова: термомеханическое модифицирование, уплотнение, физико-механическая характеристика, шпон.

Для цитирования: Лосик Е. А. Влияние технологических факторов термомеханического модифицирования на физико-механические характеристики шпона древесины березы // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2026. № 1 (300). С. 103–113.

DOI: 10.52065/2519-402X-2026-300-9.

E. A. Losik

Belarusian State Technological University

INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL FACTORS OF THERMOMECHANICAL MODIFICATION ON THE PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF BIRCH WOOD VENEER

This article presents the results of a comprehensive experimental study of the process factors involved in the thermomechanical modification (compaction) of birch veneer and their impact on its physical and mechanical properties. Changes in the thickness and density of the material are analyzed, and the abrasion and roughness characteristics of the compacted veneer are assessed. It was found that optimal compaction is achieved at a press pressure of 17 MPa, a temperature of 80–90 °C, and a holding time of 1 minute. This results in a 20% increase in veneer density and a reduction in weight loss due to abrasion to 5%, compared to approximately 20% for natural veneer.

The developed mathematical models describing the technological process were validated by statistical testing using the Cochran and Fisher criteria, demonstrating high reliability and stability of the characteristics.

These results highlight the significant potential of densified veneer as a structural and decorative material resistant to mechanical stress, abrasion, and moisture. This expands its application in the construction, furniture, and finishing industries. Further research into densified wood materials is recommended to improve product quality and optimize processing technologies.

Keywords: thermomechanical modification, compaction, physical and mechanical characteristics, veneer.

For citation: Losik E. A. Influence of technological factors of thermomechanical modification on the physical and mechanical characteristics of birch wood veneer. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2026, no. 1 (300), pp. 103–113 (In Russian).

DOI: 10.52065/2519-402X-2026-300-9.

Введение. При разработке новых строительных и конструкционных материалов на древесной основе приоритет отдается, прежде всего, физико-механическим характеристикам, обеспечивающим долговечность и надежность изделий в различных условиях эксплуатации. Хотя такие критерии, как экологичность и энергоресурсоемкость, изначально могут отходить на второй план, в конечном итоге они оказывают значительное влияние на экономическую эффективность и конкурентоспособность материала на рынке. С учетом современных трендов в области устойчивого развития и возобновляемых ресурсов растет интерес к традиционным древесным материалам. Древесина и древесные материалы, в частности шпон, – классический пример материалов, обладающих высокой прочностью при относительно низком удельном весе. Новейшие технологические решения позволяют древесине и древесным материалам конкурировать по эксплуатационным характеристикам с металлами, полимерами и керамикой.

В контексте изложенного, актуальной задачей является разработка методов целенаправленного улучшения характеристик древесного материала (шпона), направленных на повышение его конструкционных и эксплуатационных свойств, что позволяет расширить применение шпона в производстве клееных композитных материалов, столярно-строительных и мебельных изделий.

Целью настоящего исследования является изучение режимов уплотнения на физико-механические свойства модифицированного шпона березы в производстве высококачественных материалов и изделий.

Основная часть. Улучшение физико-механических и технологических характеристик древесины достигается посредством термомеханического уплотнения, обеспечивающего повышение плотности и прочности материала без разрушения волокнистой структуры. Исследования в этой области установили количественные зависимости между такими параметрами уплотнения, как давление, температура прессования, время выдержки, и конечными физико-механическими показателями [1–4]. Основываясь на современных технологических требованиях и анализе рынка строительных материалов, можно сказать, что прессование является наиболее эффективным и экономичным способом уплотнения шпона.

С физической точки зрения древесина представляет собой сложный биоматериал с многокомпонентной структурой, характеризующейся широким диапазоном пористости, достигающей до 50% объема. Технология термомеханического модифицирования шпона, включающая уплотнение под действием давления и температуры, позволяет значительно повысить его твердость, прочность, а также устойчивость к деформациям и изменениям геометрических параметров, расширяя область применения материала в конструкционных решениях [1, 2].

В процессе исследований для установления зависимостей между технологическими параметрами и физико-механическими характеристиками использовались методы планирования экспериментов полного факторного типа и *B*-план второго порядка [5].

В качестве факторов, влияющих на физико-механические характеристики древесины, были исследованы:

$x_1 (P)$ – давление плит пресса, МПа;

$x_2 (T)$ – температура плит пресса, °С;

$x_3 (t)$ – время прессования, мин.

Диапазоны изменения каждого параметра рассчитываются на основании предварительных опытных данных и соответствуют требованиям ГОСТ 16483.0–93 [6–11] и рекомендациям по древесным материалам (табл. 1).

Таблица 1. Условия проведения эксперимента
по термомеханическому модифицированию древесины и березы

Уровни варьирования	Параметры		
	<i>P</i>	<i>T</i>	<i>t</i>
Основной уровень (x_j^0)	16,7	90	1,0
Интервал варьирования (x_j)	3,0	20	0,5
Верхний уровень +1 (x_j^{\max})	19,6	100	1,5
Нижний уровень –1 (x_j^{\min})	14,7	80	0,5

Уровни параметров обозначают границы исследуемой области для каждого технологического показателя.

Основной уровень находили по формуле (1):

$$x_j^0 = \frac{x_j^{\max} - x_j^{\min}}{2}. \quad (1)$$

Интервал варьирования определили по формуле (2):

$$\Delta x_j^0 = \frac{x_j^{\max} - x_j^{\min}}{2}. \quad (2)$$

Статистическая обработка результатов определения показателей физико-механических свойств древесины выполнялась согласно методике, описанной в работе А. А. Пижурина [5].

Математические модели оценивались с применением следующих критериев:

- изменчивость выходного показателя в сериях (по критерию Кохрена G);
- значимость коэффициентов регрессии (по критерию Стьюдента t);
- адекватность модели (с использованием критерия Фишера F).

Математические модели допускались к дальнейшему использованию исключительно после подтверждения их адекватности посредством F -критерия и положительного результата проверки дисперсии по критерию Кохрена.

В B -план, состоящий из точек полного факторного плана (ПФП), было добавлено $2k$ звездных точек, таким образом общее число опытов стало 3:

$$N = 2^k + 2k = 14. \quad (3)$$

где k – количество факторов.

Матрица планирования B -плана для $k = 3$ представлена в табл. 2.

Таблица 2. Матрица планирования эксперимента по термомеханическому модифицированию древесины ольхи и березы

План	Номер опыта	Факторы						y_{ji}
		x_1	x_2	x_3	P	T	t	
ПФП	1	+	+	+	19,6	100	1,5	y_1
	2	–	+	+	14,7	100	1,5	y_2
	3	+	–	+	19,6	80	1,5	y_3
	4	–	–	+	14,7	80	1,5	y_4
	5	+	+	–	19,6	100	0,5	y_5
	6	–	+	–	14,7	100	0,5	y_6
	7	+	–	–	19,6	80	0,5	y_7
	8	–	–	–	14,7	80	0,5	y_8
Звездные точки	9	+	0	0	19,6	90	1,0	y_9
	10	–	0	0	14,7	90	1,0	y_{10}
	11	0	+	0	17,5	100	1,0	y_{11}
	12	0	–	0	17,5	80	1,0	y_{12}
	13	0	0	+	17,5	90	1,5	y_{13}
	14	0	0	–	17,5	90	0,5	y_{14}

Матрица планирования позволяет систематически и эффективно организовать эксперимент, обеспечивая всестороннее влияние всех факторов и их взаимодействий на исследуемые параметры. Это дает возможность получить независимую и точную оценку эффектов факторов, минимизируя количество необходимых опытов и повышая надежность моделирования.

Экспериментальные данные обрабатывались и анализировались с применением современных программных средств, в частности MS Excel, что обеспечивало высокую точность и математическую достоверность регрессионного моделирования.

Выбор количества повторов опыта, обозначенного как n , основывался на критериях нормальности распределения данных, постоянстве дисперсии и допустимой относительной ошибке ϵ , не превышающей 5%. Для исключения выбросов применялся критерий Стьюдента с уровнем значимости 0,05, обеспечивающий статистическую стабильность результатов.

Такой подход позволяет обеспечить достаточную точность результатов, не требуя при этом чрезмерного увеличения объема выборки. После проведения экспериментов были вычислены ключевые статистические параметры. Определено выборочное среднее \bar{Y} , которое представляет собой среднее значение всех наблюдений в выборке. Рассчитана дисперсия S^2 , которая показывает, насколько сильно значения отклоняются от выборочного среднего. Вычислено среднеквадратическое отклонение S , которое является корнем из дисперсии. Рассчитан коэффициент вариации v , представляющий собой отношение среднеквадратического отклонения к выборочному среднему, выраженному в процентах. Этот коэффициент позволяет сравнивать степень вариации между различными наборами данных, даже если они имеют разные средние значения формулы (4–7).

$$\bar{Y} = \frac{(Y_1 + Y_2 + \dots + Y_n)}{n}; \quad (4)$$

$$S^2 = \frac{(Y_1 - \bar{Y})^2 + (Y_2 - \bar{Y})^2 + \dots + (Y_n - \bar{Y})^2}{n-1}; \quad (5)$$

$$S = \sqrt{S^2}; \quad (6)$$

$$V = (S / \bar{Y}) \cdot 100\%. \quad (7)$$

Далее было определено число повторов каждой серии опытов (формула (8)):

$$n = \frac{(t^2 \cdot v^2)}{\epsilon^2}, \quad (8)$$

где t – табличное значение критерия Стьюдента, определяемое по предварительно заданному уровню значимости q и числу степеней свободы f .

Величина q во всех экспериментах принимается 0,05, а f находится из выражения, где n – количество значений в выборке [3] (формула (9)):

$$f = n - 1. \quad (9)$$

В ходе проведенного исследования, каждая серия экспериментов, включающая в себя множество отдельных измерений, подвергалась тщательному статистическому анализу. Для обработки данных использовались формулы (8) и (9).

Для обнаружения выбросов в выборке применялся критерий Стьюдента (Y_i), классический метод, предполагающий нормальное распределение данных и позволяющий определить, насколько сильно отдельное измерение отклоняется от остальных значений выборки. Если расчетное значение t -статистики для данного измерения превышало критическое значение, то это измерение считалось выбросом и временно исключалось из дальнейшей обработки. После исключения выбросов на основе оставшихся данных рассчитывались основные статистические характеристики: среднее арифметическое \bar{Y} и выборочная дисперсия S^2 .

В итоге такой многоступенчатый подход гарантировал надежность и достоверность полученных результатов с минимальным влиянием случайных ошибок и выбросов. Далее вычислялась величина $t_{\text{расч}}$ (формула (10)):

$$t_{\text{расч}} = \frac{|Y_i - \bar{Y}|}{S}. \quad (10)$$

Из таблиц распределения Стьюдента [5] по выбранному уровню значимости q и числу степеней свободы f , связанному с дисперсией S^2 , находили табличное значение t -критерия ($t_{\text{табл}}$). Если соблюдалось условие $t_{\text{расч}} > t_{\text{табл}}$, то подозреваемый результат считался промахом и исключался из выборки.

Количество параллельных измерений по каждому из параметров, который определялся в ходе исследований, принимался равным 3.

Для проверки однородности нескольких дисперсий при равных объемах всех рассматриваемых выборок $n_1 = n_2 = n_3 = \dots = n_m$ использовали критерий Кохрена. Расчетное количество G вычисляли по формуле (11):

$$G_{\text{расч}} = \frac{S_{\text{max}}^2}{S_1^2 + S_2^2 + \dots + S_m^2}, \quad (11)$$

где S_{max}^2 – наибольшая из рассматриваемых дисперсий; $S_1^2, S_2^2, \dots, S_m^2$ – дисперсии, однородность которых проверяется; m – количество выборок.

Выбрав уровень значимости q , число степеней свободы f и количество выборок m , определялась величина $G_{\text{табл}}$. При выполнении условия $G_{\text{расч}} < G_{\text{табл}}$ принималась гипотеза об однородности дисперсий.

В результате экспериментов было установлено, что оптимальные условия для обработки древесины березы следующие: влажность 6–8%, температура прессования 80–90 °C, усилие прессования 17 МПа, время выдержки 1 мин. Эти параметры обеспечивали максимальное сжатие микроструктуры древесины и улучшали ее свойства.

Расчет однородности дисперсий опытов по исследованию степени уплотнения древесины березы показал, что: расчетный G -критерий Кохрена $G_p < G_{\text{табл}}$ ($0,000575 < 0,26$) при уровне значимости $q = 0,05$ [5].

Адекватность полученных уравнений была проверена по F-критерию Фишера, $F_p < F_{\text{табл}}$ ($1,00 < 4,46$) уравнение регрессии адекватно [5].

Таким образом, проведенный статистический анализ не только подтвердил нормальность распределения и постоянство дисперсии, но и обеспечил надежные оценки ключевых характеристик исследуемых данных. Это, в свою очередь, позволило сделать обоснованные выводы и рекомендации на основе полученных результатов.

После выявления оптимальных условий уплотнения проведена серия сравнительных испытаний, направленных на детальное исследование характеристик уплотненного шпона в сравнении с его неуплотненным аналогом. Одним из первых исследуемых параметров стала плотность материала, поскольку она является одним из ключевых показателей, напрямую влияющих на физико-механические свойства древесного материала.

Для оценки этого показателя использовался метод, описанный в ГОСТ 20800–75 [12], включающий измерение массы образца и его линейных размеров с последующим вычислением плотности по формуле, определяющей отношение массы к объему материала. Таким образом, плотность рассчитывалась как частное массы на объем:

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (12)$$

где ρ – плотность материала, г/см^3 ; m – масса образца, г ; V – объем материала, см^3 .

Подготовка испытуемых образцов шпона включала изготовление образцов с точными стандартными габаритами 100×100 мм для обеспечения соизмеримости результатов. Масса каждого образца измерялась с допуском точности $\pm 0,01$ г, линейные размеры – с точностью $\pm 0,1$ мм, а толщина – с максимальной точностью $\pm 0,01$ мм [12, 13].

Линейные параметры (длина и ширина) измерялись в двух точках с учетом ориентации, параллельной долевой и продольной кромкам, толщину образца измеряли в 5 заданных точках (по углам и в центре) согласно рис. 1. Для последующей обработки результатов использовалось среднее арифметическое 5 измерений толщины образца, проведенных в 5 заранее определенных точках: в центре и в четырех углах образца согласно ГОСТ 20800–75, что позволило учесть неоднородность структуры и минимизировать погрешности [12].

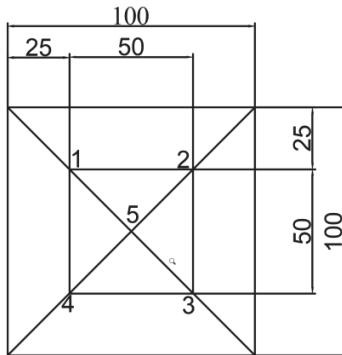


Рис. 1. Образец шпона с указанием линейных размеров и точек измерения толщины

Для каждого образца осуществлялось повторное серийное измерение параметров с целью получения репрезентативных усредненных значений, на основе которых рассчитывались достоверные и репрезентативные результаты. По ГОСТ 20800–75 рекомендуется использовать не менее трех образцов на каждый вид испытаний [12]. Однако чтобы повысить точность оценки и учесть возможную неоднородность материала, было решено взять большее число образцов – 5. Это обеспечило более надежное статистическое представление и минимизацию погрешностей при расчетах, а также повысило надежность полученных данных за счет вариаций внутри образца. Результаты по плотности и показателям уплотнения представлены в табл. 3.

Таблица 3. Данные плотности натурального и модифицированного шпона

Номер образца	Натуральный шпон	Уплотненный шпон
1	576,44	718,81
2	536,48	682,72
3	496,10	593,81
4	503,10	598,64
5	501,09	598,18
Среднее значение	522,64	651,10

Полученные данные однозначно демонстрируют увеличение плотности уплотненного шпона по сравнению с натуральным на 20 %, что свидетельствует о существенном снижении пористости и формировании более однородной и компактной волокнистой структуры. Увеличение плотности является определяющим фактором для последующих исследований прочностных и эксплуатационных параметров материала.

Исследование изменения толщины шпона проводилось по ранее описанной в ГОСТ 20800–75 [12] методике. Толщина определялась с точностью 0,01 мм в пяти фиксированных точках поверхностного профиля каждого образца. Среднее арифметическое значений толщины представлено в табл. 4.

Таблица 4. Результаты измерения толщины натурального и уплотненного шпона

Номер образца	Натуральный шпон	Уплотненный шпон
1	1,68	1,45
2	1,74	1,54
3	1,57	1,40
4	1,47	1,36
5	1,31	1,16
Среднее значение	1,56	1,18

Снижение толщины уплотненного шпона более чем на 20% обусловлено механическим воздействием давления и температуры, что способствует более плотному скреплению древесных волокон и уменьшению общей пористости. Корреляция между сокращением толщины и увеличением плотности подтверждает эффективность выбранного технологического режима уплотнения и положительное воздействие на структурную целостность материала.

Износостойкость образцов уплотненного и натурального шпона определялась весовым методом, реализованным на абрэзиметре Табера, который имитировал длительный механический износ материала, что и позволило оценить его сопротивление истирианию [14].

Для проведения испытаний были изготовлены стандартизованные образцы шпона двух типов – уплотненного и натурального – с одинаковыми геометрическими параметрами. Для обеспечения сопоставимости результатов давление абразивных дисков установлено одинаковым для всех образцов ($5,0 \pm 0,1$ Н). Это значение позволяет достаточно точно контролировать силы воздействия и оценивать износостойкость материалов, включая шпон.

Перед испытаниями каждый образец взвешивался с точностью до $\pm 0,001$ г, что позволило фиксировать малейшие изменения массы вследствие износа [13].

Испытания включали выполнение 5 циклов, каждый из которых представлял собой 200 оборотов рабочего стола абрэзиметра. После каждого цикла образцы подвергались повторному взвешиванию. 200 оборотов в испытаниях по истираемости на абрэзиметре Taber – это как минимальное количество циклов, достаточное для выявления начальных изменений поверхности материала и позволяющее оценить его износостойкость без чрезмерного износа образца. Режим в 1000 оборотов является стандартным испытательным режимом для получения устойчивых и репрезентативных данных об износостойкости. Этот параметр обеспечивал длительное воздействие абразивных кругов на материал, что позволило выявить механизмы изнашивания и сравнить различные материалы по способности сохранять свои свойства при эксплуатации [14].

Износостойкость I , г/1000 об., вычислялась по формуле (13):

$$I = m_1 - m_2, \quad (13)$$

где m_1 – масса образца перед испытанием, г; m_2 – масса образца после испытания, г.

За результат испытаний принималось среднее арифметическое всех измерений, представленных в таб. 5.

Таблица 5. Изменение массы натурального и уплотненного шпона при исследовании на износостойкость

Номер образца	Натуральный шпон		Уплотненный шпон	
	До истириания	После истириания	До истириания	После истириания
1	6,612	6,083	8,083	7,760
2	8,454	7,947	10,666	10,133
3	8,810	8,281	8,261	8,013
4	7,646	7,264	10,425	9,904
5	9,359	8,704	7,018	6,808
Среднее значение	9,869	7,656	8,890	8,524

Результаты испытаний демонстрируют, что более высокую устойчивость к механическому износу имеет уплотненный шпон. Потеря его массы была менее 5% (4,1%). Обычный шпон показал большую степень износа – масса образцов уменьшилась более чем на 20% (22,4%).

Результаты испытаний ясно указывают на существенно лучшие показатели износостойкости уплотненного шпона по сравнению с обычным. Технологический процесс уплотнения значительно улучшает физико-механические свойства шпона, повышая его плотность и снижая пористость, что делает уплотненный шпон предпочтительным материалом для областей с высоким уровнем механических воздействий и требований к стойкости покрытия. Натуральный шпон, напротив, из-за меньшей твердости проявляет высокую восприимчивость к механическому воздействию, что ограничивает его применение в условиях агрессивной эксплуатации.

Оценка параметров шероховатости поверхности – один из ключевых этапов исследования уплотненного и натурального шпона. Шероховатость поверхности существенно влияет на адгезионные свойства материалов, а также на их эстетические качества, что особенно важно в мебельной промышленности и декоративной отделке.

Измерение шероховатости поверхности уплотненного и натурального шпона проводится с использованием профилографа Mitutoyo Surftest SJ-210 согласно ГОСТ 19300–86 [15, 16]. Методика включает ряд последовательных операций, направленных на определение комплексных параметров шероховатости, таких как среднее арифметическое отклонение профиля (R_a), максимальная высота шероховатости (R_z), квадратичное среднее отклонение (R_q) и другие показатели, являющиеся критически важными для оценки качества шпона [15–16].

Перед проведением измерений задаются параметры: базовая длина измерения, количество отрезков профиля и единицы измерения с учетом требований для древесных материалов согласно нормативам и современным стандартам.

Для обеспечения репрезентативности результатов по поверхности шпона выбирались несколько характерных точек, которые охватывают участок с разной топографией, включающей гладкие поверхности и зоны с выраженной древесной текстурой и узорами.

Образцы шпона жестко фиксировались на выровненной и устойчивой опоре, предотвращая возможное смещение в процессе съемки профиля. Профилограф устанавливался с точным позиционированием измерительного зонда под углом, обеспечивающим надежный контакт без локальных деформаций поверхности. Оборудование предварительно калибровалось на эталонной поверхности для обеспечения максимальной точности и воспроизводимости данных.

В ходе измерений зонд двигался с запрограммированной скоростью по выбранной линии профиля, собирая информацию о микрорельефе поверхности шпона. Направления движения зонда выбирались как вдоль волокон шпона (продольное), так и поперек них, что обеспечивает полную характеристику топографии. На рис. 2 и 3 представлены профильные графики шероховатости уплотненного и натурального шпона соответственно.

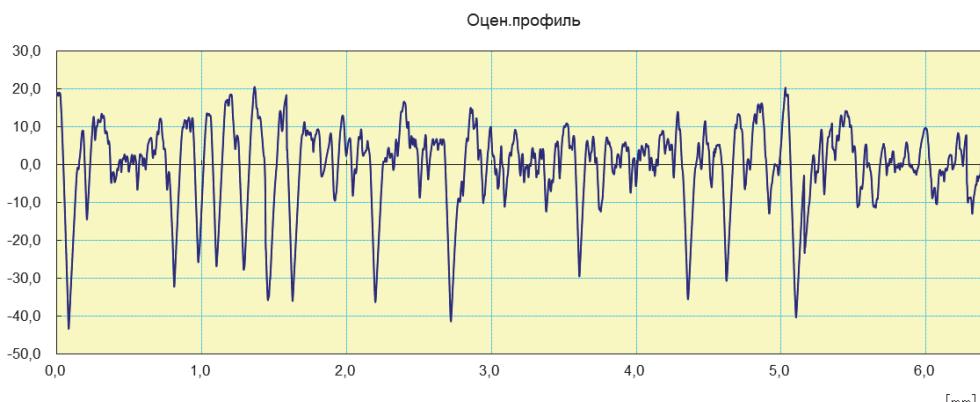


Рис. 2. Профилограмма шероховатости модифицированного шпона



Рис. 3. Профилограмма шероховатости натурального шпона

Для уплотненного шпона характерны более низкие показатели шероховатости: $R_a = 7,819$ мкм, $R_q = 10,408$ мкм, $R_z = 50,369$ мкм, что обусловлено дополнительной обработкой, снижающей амплитуду микронеровностей поверхности. В противоположность этому, натуральный шпон демонстрирует более высокие значения параметров шероховатости ($R_a = 10,243$ мкм, $R_q = 12,711$ мкм, $R_z = 55,285$ мкм), вызванные естественной структурной неоднородностью древесной поверхности.

Таким образом, использование профилографа Mitutoyo Surftest SJ-210 для измерения шероховатости поверхности шпона обеспечивает высокоточную и эффективную методику контроля качества, позволяющую объективно оценивать влияние технологических процессов на конечное состояние материала.

Заключение. В результате комплексных исследований влияния технологических факторов термомеханического модифицирования шпона древесины березы на физико-механические характеристики установлено:

– оптимальный режим уплотнения шпона достигается при давлении пресса 17 МПа, температуре плит пресса 80–90 °C и времени выдержки 1 мин, что позволяет значительно повысить качественные показатели материала;

– применение уплотненного шпона способствует существенному улучшению технических характеристик конечной продукции (композиционных материалов, столярно-строительных и мебельных изделий), что объективно подтверждается увеличением плотности на 20%, а также улучшением устойчивости к истиранию: потеря массы образцов уплотненного шпона составляет около 5%, тогда как для натурального этот показатель порядка 20%;

– разработанные математические модели, описывающие технологический процесс производства, демонстрируют адекватность регрессионных уравнений при статистической проверке на уровне значимости $q = 0,05$: критерий Кохрена $G = 0,000575$, что значительно меньше табличного значения, а критерий Фишера $F = 1$ и находится ниже порогового уровня, что свидетельствует о нормальности распределения и гомогенности дисперсий.

С учетом полученных результатов можно заключить, что уплотненный шпон обладает значительным потенциалом как конструкционный и декоративный материал, способный эффективно функционировать в условиях повышенных механических нагрузок, абразивного износа и воздействия влаги. Это открывает новые перспективы его применения в строительстве, мебельной индустрии и отделочных технологиях.

Список литературы

1. Твердость древесины // Ptechnology.ru. URL: <http://www.ptechnology.ru/MainPart/Resource/Resource2.html> (дата обращения: 05.10.2024).
2. Лосик Е. А., Игнатович Л. В. Особенность влияния структуры древесины мягколиственных пород на степень уплотнения при термомеханическом модифицировании // Лесная

инженерия, материаловедение и дизайн: материалы 88-й науч.-техн. конф. профес.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов, Минск, 24 янв. – 16 февр. 2024 г. Минск, 2024. С. 196–200.

3. Игнатович Л. В., Утгоф С. С. Особенности структурных изменений при термомеханическом модифицировании древесины сосны и ольхи // Труды БГТУ. 2016. № 2: Лесная и деревообрабатывающая промышленность. С. 192–195.

4. Утгоф С. С. Влияние технологических факторов на физико-механические характеристики уплотненной древесины мягких лиственных пород // Наука и технология строительных материалов: состояние и перспективы их развития: материалы междунар. науч.-техн. конф., Минск, 27–29 нояб. 2013 г. Минск, 2013. С. 173–176.

5. Пижурин А. А., Розенблит М. С. Исследования процессов деревообработки. М.: Лесная пром-сть, 1984. 232 с.

6. Методы отбора образцов и общие требования при физико-механических испытаниях: ГОСТ 16483.0–93. М.: Госстандарт СССР: Изд-во стандартов, 1993. 4 с.

7. Свойства древесины // Лесоматериалы. Деревянное строительство. Novosibdom. URL: <https://les.novosibdom.ru/book/export> (дата обращения: 05.10.2025).

8. Антоник А. Ю., Леонович О. К. Исследование свойств термомодифицированной древесины // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2018. № 1 (204). С. 58–63.

9. Исследование особенностей структурных изменений уплотненной древесины ольхи для изготовления столярно-строительных изделий и конструктивных элементов мебели / С. В. Шетько [и др.] // Труды БГТУ. Сер. 1. Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2020. № 1. С. 158–163.

10. Технология производства мебели: учеб. пособие / С. В. Шетько [и др.]. Минск, БГТУ, 2021. 191 с.

11. Игнатович Л. В. Изготовление многослойных паркетных досок с лицевым слоем из уплотненного шпона // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века: труды X Международного евразийского симпозиума. Екатеринбург, 22–24 сент. 2015 г. Екатеринбург, 2015. С. 41–46.

12. Шпон лущеный. Методы испытаний: ГОСТ 20800–75. М.: Госстандарт СССР: Изд-во стандартов, 1989. 7 с.

13. Методы отбора образцов и общие требования при физико-механических испытаниях: ГОСТ 16483.0–93. М.: Госстандарт СССР: Изд-во стандартов, 1975. 7 с.

14. Taber Rotary Platform Abrasion Tester Model 5135/5155. Operating Instructions. Germany: Erichsen, 2008. 56 p.

15. Профилометр // Науч.-Техн. Центр Эксперт. URL: <https://www.ntcexpert.ru/m82> (дата обращения: 05.10.2025).

16. Средства измерений шероховатости поверхности профильным методом: ГОСТ 19300–86. М.: Госстандарт СССР: Изд-во стандартов, 1987. 7 с.

References

1. Wood hardness. Available at: <http://www.ptechnology.ru/MainPart/Resourse/Resourse2.html> (accessed 05.10.2025) (In Russian).
2. Losik E. A., Ignatovich L. V. Peculiarities of the influence of the structure of softwood deciduous trees on the degree of compaction during thermomechanical modification. *Lesnaya inzheneriya, materialovedeniye i dizayn: materialy 88-y nauchno-tehnicheskoy konferentsii professorskogo-prepodavatel'skogo sostava, nauchnykh sotrudnikov i aspirantov* [Forest Engineering, Materials Science and Design: proceedings of the 88th scientific and technical conference of faculty, researchers and postgraduate students]. Minsk, 2024, pp. 196–200 (In Russian).

3. Ignatovich L. V., Utgof S. S. Features of structural changes during thermomechanical modification of pine and alder wood. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2016, no. 1: Forestry and Woodworking Industry, pp. 192–195 (In Russian).
4. Utgof S. S. The influence of technological factors on the physical and mechanical characteristics of compacted softwood deciduous trees. *Nauka i tekhnologiya stroitel'nykh materialov: sostoyaniye i perspektivy ikh razvitiya: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii* [Science and technology of building materials: status and development prospects: materials of the International scientific and technical conference]. Minsk, 2013, pp. 173–176 (In Russian).
5. Pizhurin A. A., Rozenblit M. S. *Issledovaniya protsessov derevoobrabotki* [Research into woodworking processes]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1984. 232 p. (In Russian).
6. GOST 16483.0–93. Methods of sampling and general requirements for physical and mechanical testing. Moscow, Gosstandart USSR Publ., Izdatel'stvo standartov Publ., 1983. 4 p. (In Russian).
7. Properties of wood. Available at: <https://les.novosibdom.ru/book/export> (accessed 05.10.2025) (In Russian).
8. Antonik A. Yu., Leonovich O. K. Study of the properties of thermally modified wood. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2018, no. 1 (204), pp. 58–63 (In Russian).
9. Shetko S. V., Ignatovich L. V., Prohorchik S. A., Chuikov A. S. Study of the features of structural changes in compacted alder wood for the manufacture of joinery and construction products and structural elements of furniture. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2020, no. 1, pp. 158–163 (In Russian).
10. Shetko S. V., Ignatovich L. V., Chuikov A. S., Uthof S. S. *Tekhnologiya proizvodstva mebeli* [Technology of furniture production]. Minsk, BSTU Publ., 2021. 355 p. (In Russian).
11. Ignatovich L. V. Production of multilayer parquet boards with a front layer of compacted veneer. *Derevoobrabotka: tekhnologii, oborudovaniye, menedzhment XXI veka: trudy X Mezhdunarodnogo evraziyskogo simpoziuma* [Woodworking: technologies, equipment, management of the XXI century: proceedings of the X International Eurasian Symposium]. Ekaterinburg, 2015, pp. 41–46 (In Russian).
12. GOST 20800–75. Peeled veneer. Test methods. Moscow, Gosstandart USSR Publ., Izdatel'stvo standartov Publ., 1975. 7 p. (In Russian).
13. GOST 16483.0–93. Methods of sampling and general requirements for physical and mechanical testing. Moscow, Gosstandart USSR Publ., Izdatel'stvo standartov Publ., 1993. 7 p. (In Russian).
14. Taber Rotary Platform Abrasion Tester Model 5135/5155. Operating Instructions. – Germany. Erichsen, 2008. 56 p.
15. Profilometer. Available at: <https://www.ntcexpert.ru/m82> (accessed 05.10.2025) (In Russian).
16. GOST 19300–86. Surface roughness measuring instruments using the profile method. Moscow, Gosstandart USSR Publ., Izdatel'stvo standartov Publ., 1987. 7 p. (In Russian).

Информация об авторе

Лосик Екатерина Анатольевна – ассистент кафедры инженерной графики. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: katerinalosik17@gmail.com.

Information about the author

Losik Ekaterina Anatol'evna – assistant lecturer, the Department of Engineering Graphics. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: katerinalosik17@gmail.com.

Поступила 15.10.2025