

**Б. В. Войтеховский, С. А. Гриневич, А. Ф. Аникеенко**  
Белорусский государственный технологический университет

**ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ  
ЛАМИНИРОВАННЫХ ДРЕВЕСНОСТРУЖЕЧНЫХ ПЛИТ  
НАКЛОННЫМИ РЕЖУЩИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ  
ПО КРИТЕРИЮ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ**

В мебельной промышленности широкое применение находят ламинированные древесностружечные плиты. Фрезерование кромок этого материала является довольно энергоемким процессом, и снижение энергетических затрат представляет собой важную задачу как с научной, так и с практической точки зрения. Одним из способов снижения энергопотребления и повышения качества обработки является создание угла наклона режущих элементов.

В настоящее время энерго- и ресурсосбережение является одной из наиболее актуальных задач для деревообрабатывающего и мебельного производства. Одним из направлений решения данной задачи может быть определение рациональных режимов механической обработки древесины и древесных материалов, обеспечивающих требуемое качество обработки при минимальных затратах на энергопотребление и дереворежущий инструмент.

В результате проведенных исследований процесса цилиндрического фрезерования кромок ламинированной древесностружечной плиты выявлены следующие основные технологические факторы: толщина стружки, величина припуска, скорость резания, угол наклона резца, угол резания. Критерием остановки эксперимента являлось появление недопустимых сколов на поверхности ламината. Обработка экспериментальных данных позволила получить математические зависимости для определения величины фаски по задней поверхности режущего элемента и для расчета пути резания по критерию качества.

Проведена оптимизация режимов обработки с целью получения максимальной стойкости дереворежущего инструмента с учетом возможного числа его переточек.

**Ключевые слова:** древесностружечная плита, фрезерование, технологические факторы, оптимизация, стойкость.

**Для цитирования:** Войтеховский Б. В., Гриневич С. А., Аникеенко А. Ф. Оптимизация процесса цилиндрического фрезерования ламинированных древесностружечных плит наклонными режущими элементами по критерию технологической стойкости // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2025. № 2 (294). С. 182–187.

DOI: 10.52065/2519-402X-2025-294-19.

**B. V. Voitechovsky, S. A. Grinevich, A. F. Anikeenko**  
Belarusian State Technological University

**OPTIMIZATION OF THE PROCESS OF CYLINDRICAL MILLING  
OF LAMINATED WOOD CHIPBOARDS WITH INCLINED CUTTING  
ELEMENTS BASED ON THE CRITERION OF TECHNOLOGICAL DURABILITY**

Laminated wood chipboards are widely used in the furniture industry. Milling the edges of this material is a rather energy-intensive process and reducing energy costs is an important task both from a scientific and practical point of view. One of the ways to reduce energy consumption and improve the processing quality is to create an inclination angle of cutting elements.

Currently, energy and resource saving is one of the most urgent tasks for woodworking and furniture production. One of the ways to solve this problem may be to set rational modes of mechanical processing of wood and wood materials that ensure the required processing quality at minimal cost of energy consumption and woodworking tools.

As a result of the conducted studies of the process of cylindrical milling of the laminated wood chipboard edges the following main technological factors were identified: chip thickness, allowance value, cutting speed, angle of cutter inclination, cutting angle. The criterion for stopping the experiment was the

appearance of unacceptable chips on the laminate surface. The processing of experimental data made it possible to obtain mathematical dependencies for determining the chamfer value along the back surface of the cutting element and for calculating the cutting path according to the quality criterion.

The optimization of processing modes has been carried out in order to obtain maximum durability of the wood-cutting tool taking into account the possible number of its sharpening.

**Keywords:** wood chipboards, milling, technological factors, optimization, durability.

**For citation:** Voitekhovsky B. V., Grinevich S. A., Anikeenko A. F. Optimization of the process of cylindrical milling of laminated wood chipboards with inclined cutting elements based on the criterion of technological durability. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2025, no. 2 (294), pp. 182–187 (In Russian).

DOI: 10.52065/2519-402X-2025-294-19.

**Введение.** Ламинированные древесностружечные плиты (ЛДСП) нашли широкое распространение в мебельном производстве. Благодаря различному по цвету и текстуре покрытию из ламината, дизайнеры мебели получили широкое поле деятельности для проектирования конкурентоспособной современной мебели.

Однако механическая обработка данного вида материала является довольно трудоемким процессом [1–3]. Это обусловлено тем, что плотность поверхностных слоев ДСП в несколько раз больше, чем в ее средней части. Также в поверхностных слоях находится большее количество связующего (смолы). Эти особенности сильно сказываются на характере износа режущего инструмента и его стойкости.

На степень износа и характер затупления инструментов влияют: физико-механические свойства и структура материала режущих элементов, геометрические и угловые параметры режущих элементов, физико-механические свойства обрабатываемого материала, условия и режим резания (вид резания, глубина резания и толщина стружки, скорость резания и подачи), условия и режим работы инструмента (точность, жесткость и колебания инструмента, состояние станка, продолжительность работы инструмента и др.), качество подготовки инструмента к работе (заточка и доводка режущих элементов).

Поэтому деревообрабатывающий инструмент для фрезерования ЛДСП должен быть оснащен режущими элементами с повышенной износостойкостью.

Особенностью затупления резца при фрезеровании ЛДСП является то, что участки лезвия, обрабатывающие более плотные слои, изнашиваются быстрее (рис. 1).

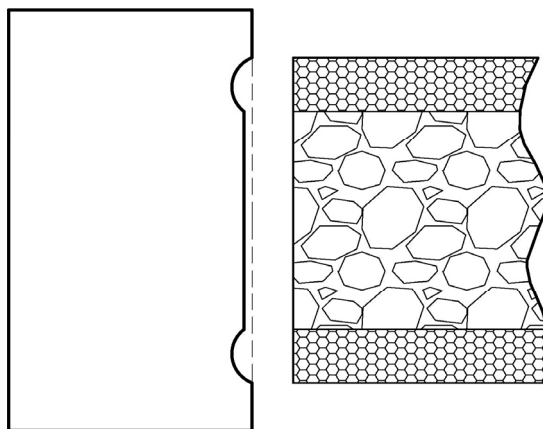


Рис. 1. Особенности износа режущего элемента при фрезеровании ЛДСП

Такой вид износа подтвержден многими авторами, которые изучали данную проблему [4–6]. Износ дереворежущего инструмента в значительной степени зависит от режима обработки, материала резца и др. Основным критерием для оценки затупления режущего

инструмента при обработке ЛДСтП, является величина фаски по задней поверхности  $\eta$ . Поэтому данный критерий был выбран главным при оценке затупления резца при проведении эксперимента.

Вторым, не менее важным фактором при обработке ЛДСтП является критерий технологической стойкости [7, 8]. Технологическая стойкость – период работы инструмента, в пределах которого сохраняется требуемый уровень качества обработки. Она может быть выражена в единицах времени, метрах пути резания, погонных метрах обработанного материала. Для наглядности и простоты обработки результатов эксперимента наиболее целесообразно выражать технологическую стойкость в метрах пути контакта резца  $L$  с обрабатываемым материалом до появления первых сколов на поверхности обрабатываемого материала. Целью данной работы является получение оптимального режима обработки ЛДСтП наклонными режущими элементами, при котором стойкость инструмента по критерию качества будет максимальна с учетом количества перезаточек.

**Основная часть.** На базе Белорусского государственного технологического университета были проведены исследования влияния основных технологических факторов (угла наклона режущей кромки  $\omega$ , угла резания  $\delta$ , скорости резания  $V$ , величины припуска  $h$ , толщины стружки  $a$ ) на величину износа режущего инструмента по задней поверхности (величину фаски  $\eta$ ) и технологическую стойкость, выраженную в метрах пути  $L$ , при цилиндрическом фрезеровании кромок ЛДСтП. На основании методов планирования эксперимента составлена методическая сетка опытов. Опыты проведены на экспериментальной установке, созданной на базе промышленного четырехстороннего продольно-фрезерного станка марки С26-2М. Экспериментальная установка позволяет плавно изменять частоту вращения режущего инструмента (от 0 до 6000 мин<sup>-1</sup>) и скорость подачи обрабатываемого материала (от 0 до 30 м/мин).

Методика проведения опытов представлена в работе [9].

Для определения износа режущего инструмента по задней грани использовался метод слепков (рис. 2). Достоинством данного метода является возможность получения информации о динамике затупления режущего элемента без его снятия с фрезы и последующего повторного базирования при установке назад в режущий инструмент, что гарантирует чистоту проведения эксперимента.

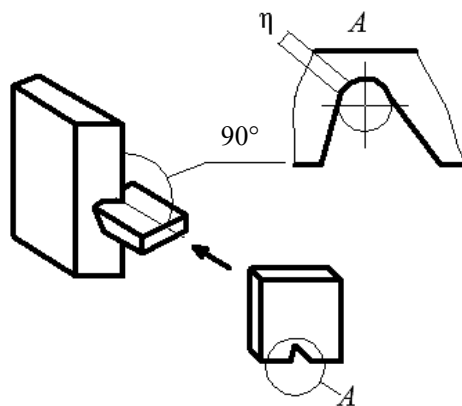


Рис. 2. Иллюстрация к методу слепков

Условия проведения опытов представлены в таблице.

После реализации методической сетки опытов и проведения статистического анализа результатов [10, 11] были получены регрессионные математические модели (1, 2), отражающие влияние основных технологических факторов на величину фаски по задней поверхности  $\eta$  и технологическую стойкость режущего инструмента по критерию качества, выраженную в длине пути резания  $L$ .

$$\eta = 1066,537 + 11,702 \cdot \omega - 24,497 \cdot \delta - 3,905 \cdot V - 0,565 \cdot h - 282,267 \cdot a + 0,036 \cdot \omega^2 + 0,078 \cdot V^2 - 0,138 \cdot \omega \cdot \delta + 0,017 \cdot \omega \cdot V + 0,643 \cdot \omega \cdot h + 16,470 \cdot \omega \cdot a - 0,053 \cdot \delta \cdot V - 0,581 \cdot \delta \cdot h + 0,893 \cdot V \cdot h + 2,303 \cdot V \cdot a + 55,300 \cdot h \cdot a; \quad (1)$$

$$L = 490,31 + 121,25 \cdot \omega + 0,64 \cdot \delta + 0,32 \cdot V - 51,11 \cdot h - 2218,05 \cdot a + 4,98 \cdot \omega^2 - 2,61 \cdot \omega \cdot \delta + 1,21 \cdot \omega \cdot V + 24,75 \cdot \omega \cdot h + 288,03 \cdot \omega \cdot a + 62,78 \cdot V \cdot a + 917,19 \cdot h \cdot a. \quad (2)$$

Данные модели позволяют математически описать процесс при обработке кромок ЛДСтП методом фрезерования. Адекватность полученных математических моделей подтверждена проверкой по F-критерию Фишера.

Эксперимент ранее описан в научных статьях [12, 13].

На основании полученных данных решено провести оптимизацию режимов обработки по критерию обеспечения максимальной технологической стойкости с учетом количества возможных переточек режущего инструмента. Оптимизация процессов механической обработки ЛДСтП будет способствовать увеличению производительности деревообрабатывающего оборудования и уменьшению трудоемкости производства единицы продукции.

Таблица 1. Условия проведения опытов исследования технологической стойкости при цилиндрическом фрезеровании кромок ЛДСтП

Факторы	Условное обозначение	Нижний уровень (-1)	Основной уровень (0)	Верхний уровень (+1)	Интервал варьирования $\Delta$
Переменные факторы					
Угол наклона режущей кромки, град	$X1 [\omega]$	0	15	30	15
Угол резания, град	$X2 [\delta]$	60	70	80	10
Скорость резания, м/с	$X3 [V]$	20	35	50	15
Толщина срезаемого слоя, мм	$X4 [h]$	1,5	3,0	4,5	1,5
Толщина стружки, мм	$X5 [a]$	0,05	0,25	0,45	0,20
Постоянные факторы обрабатываемого материала					
Основа	ДСтП				
Облицованный слой	Ламинат				
Ширина фрезерования $B$ , мм	25				
Влажность, %	$8 \pm 2$				
Материал лезвия режущего инструмента	Твердый сплав ВК6				
Диаметр фрезы $D$ , мм	180				

Математически поставленная задача может быть выражена как

$$S_{\Sigma} = S \cdot (1 + n) \rightarrow \max, \quad (3)$$

где  $S_{\Sigma}$  – суммарная технологическая стойкость режущего инструмента с учетом возможных переточек, п. м;  $S$  – технологическая стойкость режущего инструмента в пределах одной переточки, п. м;  $n$  – возможное количество переточек режущего инструмента, определяется по формуле

$$n = \frac{a_{\text{стач}}}{b}, \quad (4)$$

где  $a_{\text{стач}}$  – допускаемая величина стачивания за срок службы, мм;  $b$  – величина стачивания за одну переточку, мм.

Допускаемая величина стачивания твердосплавных ножей за срок службы согласно пособиям [14, 15]  $a_{\text{стач}} = 8-10$  мм.

На рис. 3 представлена схема для определения величины стачивания  $b$ , где  $\alpha$  – задний угол;  $\beta$  – угол заточки;  $\gamma$  – передний угол.

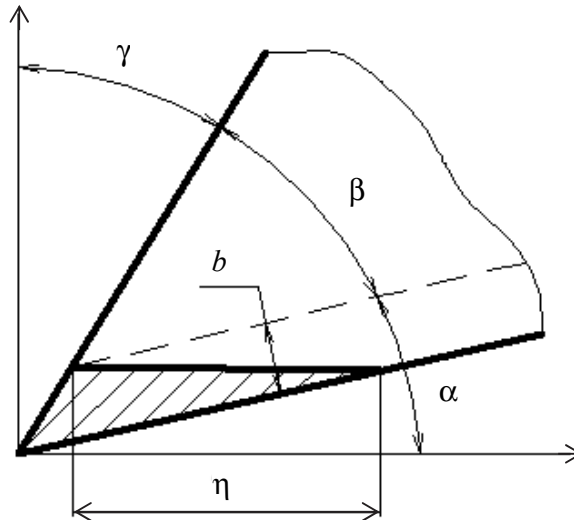


Рис. 3. Схема определения величины стачивания

Величина стачивания за одну переточку зависит от степени затупления режущего инструмента, т. е. в нашем случае от величины фаски по задней поверхности ножа  $\eta$ .

На основании рис. 3 величину  $b$  можно записать в виде

$$b = \eta \cdot \sin \alpha. \quad (5)$$

Технологическая стойкость  $S$ , выраженная в погонных метрах обработанного материала, связана с величиной пути резания и может быть выражена через формулу

$$S = \frac{L \cdot a \cdot z}{h}, \quad (6)$$

где  $z$  – число режущих элементов в фрезе, шт.

Подставив уравнения (4), (5), (6) в выражение (3), получим

$$S_{\Sigma} = \frac{L \cdot a \cdot z}{h} \cdot \left( 1 + \frac{a_{\text{стач}}}{\eta \cdot \sin \alpha} \right) \rightarrow \max. \quad (7)$$

**Заключение.** Условия максимума функции (7) найдены с помощью пакета MathCad.

Так, при  $z = 1$  наибольшая технологическая стойкость с учетом возможного количества переточек составила 219 900 п. м при следующих значениях основных переменных технологических факторов: угол наклона режущей кромки  $\omega = 30^\circ$ , угол резания  $\delta = 72,9^\circ$ , скорость резания  $V = 48,8$  м/с, величина припуска на обработку  $h = 1,5$  мм, толщина стружки  $a = 0,45$  мм.

Допускаемая величина стачивания при расчете принята  $a_{\text{стач}} = 8$  мм. С учетом полученных значений технологическая стойкость режущего инструмента в пределах одной переточки  $S = 3198$  п. м, величина фаски по задней поверхности режущего элемента  $\eta = 456,2$  мкм, а величина стачивания за одну переточку  $b = 118$  мкм.

## Список литературы

1. Хуажев О. З. Исследование и разработка рациональных режимов резания и инструментов для обработки кромок облицованных древесностружечных плит: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.06.02. Л., 1982. 21 с.
2. Зотов Г. И. Энергоемкость резания // *Дерево.RU*. 2008. № 1. С. 132–134.
3. Аникеенко А. Ф., Фридрих А. П. Рекомендации по методике проведения исследований в области механической обработки ламинированных древесностружечных плит // *Труды БГТУ*. 2011. № 2: Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 313–317.
4. Цуканов Ю. А., Амалицкий В. В. Обработка резанием древесностружечных плит. М.: Лесная пром-сть, 1966. 95 с.
5. Гришкевич А. А. Моделирование процесса фрезерования древесностружечных плит, облицованных натуральным шпоном, по качественным показателям // *Лес-96: тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф. Минск, 1996*. С. 19.
6. Бершадский А. Л., Цветкова Н. И. Резание древесины: учеб. пособие. Минск: Выш. шк., 1975. 304 с.
7. Клубков А. П., Войтеховский Б. В. Критерии затупления дереворежущего инструмента при фрезеровании древесины и древесных материалов // *Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть*. 2007. Вып. XV. С. 222–224.
8. Войтеховский Б. В., Гриневич С. А., Лукаш В. Т. Исследование стойкости фрезерного инструмента с наклонными резцами при обработке кромок ДСтП // *Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть*. 2007. Вып. XV. С. 225–229.
9. Войтеховский Б. В., Гриневич С. А. Влияние технологических факторов на качество обработанной поверхности при фрезеровании ламинированных ДСтП // *Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть*. 2008. Вып. XVI. С. 323–327.
10. Пижурин А. А., Пижурин А. А. Моделирование и оптимизация процессов деревообработки. М.: Моск. гос. ун-т леса, 2004. 376 с.
11. Гриневич С. А., Войтеховский Б. В. Исследование технологической стойкости при фрезеровании ламинированных древесностружечных плит наклонными резцами // *Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть*. 2010. Вып. XVIII. С. 284–286.
12. Войтеховский Б. В., Гриневич С. А. Особенности износа твердосплавного инструмента при фрезеровании ламинированных ДСтП наклонными ножами // *Труды БГТУ*. 2011. № 2: Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 252–255.
13. Амалицкий В. В., Санев В. И. Оборудование и инструмент деревообрабатывающих предприятий. М.: Экология, 1992. 480 с.

## References

1. Khuazhev O. Z. *Issledovaniye i razrabotka ratsional'nykh rezhimov rezaniya i instrumentov dlya obrabotki kromok oblitsovannykh drevesnostruzhechnykh plit. Avtoreferat dissertatsii kandidata tekhnicheskikh nauk* [Research and development of rational cutting modes and tools for processing edges of faced chipboards. Abstract of thesis PhD (Engineering)]. Leningrad, 1982. 21 p. (In Russian).
2. Zotov G. I. Energy intensity of cutting. *Derevo.RU* [Wood.RU], 2008, no. 1, pp. 132–134 (In Russian).
3. Anikeenko A. F., Fridrich A. P. Recommendations on the methodology for conducting research in the field of mechanical processing of laminated chipboards. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2011, no. 2: Forest and Woodworking Industry, 2011, pp. 313–317 (In Russian).
4. Tsukanov Yu. A., Amalitskiy V. V. *Obrabotka rezaniyem drevesnostruzhechnykh plit* [Cutting processing of chipboards]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1966. 95 p. (In Russian).
5. Grishkevich A. A. Modeling the process of milling chipboards faced with natural veneer, according to quality indicators. *Les-96: tezisy докладov Mezhdunarodnoy nauchno-praktichskoy*

*konferentsii* [Forest-96: abstracts of reports of the international scientific and practical conference]. Minsk, 1996, p. 19 (In Russian).

6. Bershadskiy A. L., Tsvetkova N. I. *Rezaniye drevesiny* [Wood cutting]. Minsk, Vysheyshaya shkola Publ., 1975. 304 p. (In Russian).

7. Klubkov A. P., Voitekhovskiy B. V. Criteria for blunting wood cutting tools during milling of wood and wood materials. *Trydy BGTU* [Proceedings of BSTU], series II, Forest and Woodworking Industry, 2007, issue XV, pp. 222–224 (In Russian).

8. Voitekhovskiy B. V., Grinevich S. A., Lukash V. T. Study of the durability of milling tools with inclined cutters when processing chipboard edges. *Trydy BGTU* [Proceedings of BSTU], series II, Forest and Woodworking Industry, 2007, issue XV, pp. 225–229 (In Russian).

9. Voitekhovskiy B. V., Grinevich S. A. Influence of technological factors on the quality of the machined surface during milling of laminated chipboard. *Trydy BGTU* [Proceedings of BSTU], series II, Forest and Woodworking Industry, 2008, issue XVI, pp. 323–327 (In Russian).

10. Pizhurin A. A., Pizhurin A. A. *Modelirovaniye i optimizatsiya protsessov derevoobrabotki* [Modeling and optimization of woodworking processes]. Moscow, Moscow State Forest University Publ., 2004. 376 p. (In Russian).

11. Grinevich S. A., Voitekhovskiy B. V. Investigation of technological stability during milling of laminated chipboards with inclined cutters. *Trydy BGTU* [Proceedings of BSTU], series II, Forest and Woodworking Industry, 2010, issue XVIII, pp. 284–286 (In Russian).

12. Voitekhovskiy B. V., Grinevich S. A. Features of wear of hard-alloy tools during milling of laminated chipboard with inclined knives. *Trydy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2011, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 252–255 (In Russian).

13. Amalitskiy V. V., Sanev V. I. *Oborudovaniye i instrument derevoobrabatyvayushchikh predpriyatiy* [Equipment and tools for woodworking enterprises]. Moscow, Ecologiya Publ., 1992. 480 p. (In Russian).

### Информация об авторах

**Войтеховский Борис Викторович** – старший преподаватель кафедры деревообрабатывающих станков и инструментов. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: voitechovskiy@belstu.by

**Гриневич Сергей Анатольевич** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры деревообрабатывающих станков и инструментов. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: gres410a@ya.ru

**Аникеенко Андрей Федорович** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой деревообрабатывающих станков и инструментов. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: dosy@belstu.by

### Information about the authors

**Voitekhovskiy Boris Viktorovich** – Senior Lecturer, the Department of Engineering Graphics. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: voitechovskiy@belstu.by

**Grinevich Sergey Anatol'yevich** – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Woodworking Machines and Tools. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: gres410a@ya.ru

**Anikeenko Andrey Fedorovich** – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Woodworking Machines and Tools. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dosy@belstu.by

Поступила 17.03.2025