

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/24>

УДК 630* 674.055:621.9.06



Влияние геометрических параметров режущего инструмента на показатели точности при пилении ленточными пилами

А. Стародубов¹, alexoldoak@mail.ru,  <https://orcid.org/0009-0007-9735-7696>

А. Платонов¹,  aleksey66@yandex.ru,  <https://orcid.org/0000-0001-5941-6287>

Лариса В. Брындина¹, bryndinv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-2345-6789>

¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация

Повышение точности пиления на ленточнопильных станках является важной задачей для лесопильной промышленности, особенно для малых и средних предприятий. Волнистость пропила приводит к значительным потерям древесины при последующей механической обработке, которые могут в несколько раз превышать потери от ширины пропила. Существующие стандарты не учитывают данный параметр, что обуславливает необходимость разработки новых технических решений. Цель - повышение точности процесса пиления и снижение волнистости пропила при раскросе круглых лесоматериалов путем оптимизации геометрических параметров зубьев ленточной пилы. Проведено экспериментальное исследование влияния геометрии зубьев ленточной пилы на точность распиловки сосновых бревен на горизонтальном ленточнопильном станке «Спектр 70». Разработана конструкция экспериментальной пилы с оптимизированным профилем зубьев. Установлено, что величина волнистости возрастает по мере продвижения пропила в бревне и при затуплении инструмента. Применение экспериментальной пилы позволяет снизить волнистость пропила на 7-10% и уменьшить потери древесины при последующей обработке. Результаты работы могут быть использованы для повышения эффективности раскроса пиловочного сырья на малогабаритном лесопильном оборудовании.

Ключевые слова: ленточнопильный станок, параметры ленточной пилы, волнистость пропила, качество пиломатериалов, пропил, раскрой лесоматериалов

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Стародубов А.С. Влияние геометрических параметров режущего инструмента на показатели точности при пилении ленточными пилами / А.С. Стародубов, А.Д. Платонов, Л.В. Брындина // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 4 (60). – С. 405–420. – Библиогр.: с. 417-419 (23 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/24>.

Поступила 30.05.2025. **Пересмотрена** 15.11.2025. **Принята** 30.11.2025. **Опубликована онлайн** 26.12.2025.

Article

The influence of geometric parameters of the cutting tool on the accuracy indicators when sawing with band saws

A. Starodubov¹, alexoldoak@mail.ru,  <https://orcid.org/0009-0007-9735-7696>

A. Platonov¹,  aleksey66@yandex.ru,  <https://orcid.org/0000-0001-5941-6287>

Larisa V. Bryndina¹, bryndinv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-2345-6789>

¹*Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation*

Abstract

Improving sawing accuracy on band saw machines is an important task for the sawmill industry, especially for small and medium-sized enterprises. Kerf waviness leads to significant wood losses during subsequent mechanical processing, which can be several times higher than the losses from the kerf width itself. Current standards do not account for this parameter, which necessitates the development of new technical solutions. To improve the accuracy of the sawing process and reduce kerf waviness when cutting round timber by optimizing the geometric parameters of the band saw teeth. An experimental study was conducted on the influence of band saw tooth geometry on the sawing accuracy of pine logs using the "Spectr 70" horizontal band saw machine. A design of an experimental saw with an optimized tooth profile was developed. It was found that the degree of waviness increases as the cut progresses through the log and as the tool becomes dull. The use of the experimental saw reduces kerf waviness by 7-10% and decreases wood losses during subsequent processing. The results of the work can be used to improve the efficiency of sawlog processing on small-sized sawmill equipment.

Keywords: *band saw, band saw parameters, undulation of the cut, quality of lumber, cutting, cutting of timber*

Conflict of interest: the authors declares no conflict of interest.

For citation: Starodubov A.S., Platonov A.D., Bryndina L.V. (2025). The influence of geometric parameters of the cutting tool on the accuracy indicators when sawing with band saws. *Forestry Engineering journal*, Vol. 15, No. 4 (60), pp. 405–420 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/24>.

Received 30.05.2025. **Revised** 15.11.025. **Accepted** 30.11.2025. **Published online** 26.12.2025.

Введение

Актуальность темы обусловлена повсеместным распространением ленточнопильного оборудования в лесопилении и деревообработке. Особенно остро вопрос точности и качества распила стоит перед малыми и средними предприятиями, для которых каждая единица продукции напрямую влияет на экономическую эффективность. В отличие от циркулярных пил, ленточные пилы обладают рядом преимуществ, таких как малая ширина пропила и высокая

производительность при работе с крупными заготовками. Однако эти преимущества могут быть нивелированы такими дефектами, как волнистость поверхности распила, вызванными несовершенством геометрических параметров инструмента и его подготовки.

Ключевой проблемой, с которой сталкиваются операторы, является неустойчивость пилы в пропилах, приводящая к образованию «волны» на поверхности пиломатериала.

Исследования показывают, что более 90% случаев возникновения волны связаны с некачественной разводкой зубьев, а еще 5% – с заточкой. Это доказывает, что геометрия пилы – не теоретический параметр, а прямой фактор, влияющий на рентабельность производства.

Степень научной разработанности проблемы достаточно высока. Ведущие производители, такие как Wood-Mizer, много лет инвестируют в исследования оптимальной геометрии пильного полотна, разрабатывая специализированные профили зубьев для различных пород древесины [1].

В научной и отраслевой литературе подробно описаны основные геометрические параметры: передний и задний углы, шаг зуба, высота зуба и радиус в его основании, а также развод – и их влияние на процесс резания. Существуют конкретные рекомендации по выбору углов заточки в зависимости от твердости обрабатываемой древесины.

Одним из основных преимуществ малогабаритных горизонтальных ленточнопильных станков перед лесопильными рамами является обеспечение узкого пропила благодаря тонкой ленточной пиле. Но на основе предварительных исследований толщины выпиленных досок установлено, что пропил имеет значительную волнистость по длине пиломатериала. Непрямолинейность траектории движения ленточной пилы в процессе пиления обусловлена влиянием ряда факторов, определяемых динамической системой «станок-инструмент-заготовка» (СИЗ) [2, 21]. Непрямолинейность или волнистость пропила может приводить и к значительной разнотолщинности досок, тем самым к увеличению потерь древесины при последующей операции механической обработки. В связи с чем, снижение волнистости и разнотолщинности пиломатериалов при раскросе бревен является актуальной задачей.

Волнистость древесины представляет собой явление, при котором на поверхности материала наблюдаются периодические изменения толщины распила. Это явление связано с колебаниями инструмента, используемого для резки, и может

значительно повлиять на качество конечного продукта. Волнистость определяется как результат взаимодействия механических и технологических факторов, которые приводят к неравномерности обработки материала.

В основе механизма образования волнистости в процессе пиления древесины является вибрация ленточной пилы. Вибрации могут быть вызваны неравномерным распределением нагрузки на инструмент, а также дефектами в конструкции оборудования. Колебания создают периодические изменения в траектории движения пилы, что и приводит к образованию волнистости на поверхности древесины. Изменение траектории пилы в пропиле зависит и от усилия натяжения полотна пилы на что указывают [6,13], а также конструкции привода ленточной пилы, на что указывается в работе. [17].

В работе [5] повышение работоспособность ленточной пилы достигается за счет равномерного распределения компенсирующих напряжений в материале инструмента по всему массиву миниполосового участка, за счет формирования однородного поля внутренних остаточных компенсирующих напряжений в полотне ленточной пилы теплофизическим методом.

Параметры распиловки, такие как скорость, угол и глубина реза, взаимно влияют на процесс формирования волнистости, сочетание высокой скорости резания с оптимальным углом может значительно улучшить качество поверхности древесины. При этом недостаточная толщина срезаемого слоя может снизить эффективность процесса резания.

Скорость резания является одним из ключевых параметров, влияющих на образование волнистости. При увеличении скорости резания от 15 до 60 м/с, можно достичь более ровного распила. Однако чрезмерное увеличение скорости может привести к перегреву пилы, что негативно сказывается на качестве резания. Таким образом, выбор подходящей скорости является важным аспектом минимизации волнистости. Эти данные хорошо согласуются с исследованиями, представленными в работах [6,8 ,22].

Глубина срезаемого слоя влияет на распределение напряжений в древесине во время распиловки, что, в свою очередь, оказывает существенное влияние на образование волнистости. Однако, увеличение глубины реза повышает вероятность возникновения внутренних напряжений, способных вызвать деформацию поверхности.

Большое влияние на величину волнистости оказывает плотность древесины. В работе [8] отмечено, что при резании мягкой древесины возникают более сложные явления по сравнению с резанием более плотной. Это связано с более интенсивным трением полотна пилы в пропилах и реза о стружку и древесину. Ширина пилы обеспечивает оптимальный баланс между гибкостью и её устойчивостью в пропилах. Использование более широких пил предпочтительно для распиловки бревен из твёрдых пород древесины, а менее широких – для мягкой древесины.

Свойства древесины, такие как плотность и влажность, имеют значительное влияние на процесс распиловки и могут способствовать образованию волнистости. Породы древесины с высокой плотностью, больше подвержены этому явлению. Это объясняется тем, что такие материалы создают повышенное сопротивление инструменту, что, в свою очередь, усиливает вибрации и колебания пилы. Качество выпиливаемых пиломатериалов зависит и от размерных характеристик сырья. Рациональный выбор схемы раскроя бревна позволяет минимизировать влияние вибраций на качество конечного продукта. В работах [3,11], Табенкин, А.Н. [17], показано, что плотность распиливаемой древесины и сила резания оказывают влияние и на шероховатость пиломатериалов.

Точность раскроя является основным показателем качества работы ленточной пилы. Форма зубьев пилы при этом имеет определяющую роль. Форма ленточной пилы, включая профиль её зубьев, оказывает значительное влияние на качество обработки древесины. Это особенно важно при распиловке древесины мягких пород. По данным исследований [14,17], форма зубьев пилы оказывает

влияние на глубину пропила и угол атаки, что также сказывается на конечном результате обработки. Установлено, что качество процесса резания и оптимальность выбранного режима на ленточно-отрезном станке наиболее точно характеризуется получаемой в результате пиления стружкой.

Форма зубьев пилы способствует высокой точности распиловки, что особенно актуально в условиях промышленного производства и поиск рациональной формы и геометрических параметров зубьев является актуальным направлением исследований [9, 12].

Процесс резания древесины также зависит от геометрии режущего инструмента, что показано в работах [8, 10]. Важно учитывать, что в процессе пиления ленточными пилами с зубьями из различных материалов и с различной геометрией схема сил резания и деформаций полотна отличается. По мнению авторов [6,9] именно это позволяет достичь оптимальных значений стойкости инструмента.

Конструкция с выпуклым профилем зубьев, отличающаяся, как угловыми параметрами, так и формой впадины с увеличенным радиусом изгиба, способствует эффективному удержанию и сжатию опилок в пропилах, делая ее наиболее подходящей для обработки древесины мягких хвойных пород отмечено в работах [7,14].

Обработка указанных форм зубьев выполняется с использованием автоматизированных станков, предназначенных для заточки ленточных пил. В процессе заточки, важно уделять внимание соответствию профиля и толщины точильного диска в зависимости от параметров зубьев, особенно для зубьев с выпуклой формой (рис. 1б).

В большинстве случаев используют конфигурации зубьев для ленточных пил, которые представлены на рис.1.

Кроме того, правильный выбор формы зубьев позволяет адаптировать пилу под различные задачи, такие как продольное или поперечное пиление. В проектировании ленточных пил с ребристыми зубьями уделяют внимание увеличению переднего угла зуба γ , так как данный параметр существенно влияет на эффективность процесса пиления.

Большой передний угол уменьшает силу, необходимую для проведения процесса резания. Это облегчает тем самым работу резания на пилах малой толщины, что критично для обеспечения их долговечности. Кроме того, такое конструктивное решение минимизирует горизонтальные нагрузки на пилу, предотвращая ее смещение или соскальзывание со шкивов в процессе эксплуатации.

Вместе с тем, увеличение переднего угла γ необходимо координировать с характеристиками

обрабатываемой древесины и существующими стандартами на прочность режущего элемента. Эта прочность определяется соответствием габаритов режущего элемента и угла заострения β . Угол заострения зубьев ленточных пил необходимо поддерживать в диапазоне от 40 до 55 градусов, что напрямую зависит от величины твердости распиливаемой древесины. В табл. 1 представлены значения углов заострения для зубьев, зависящие от технологических характеристик обрабатываемой древесины.

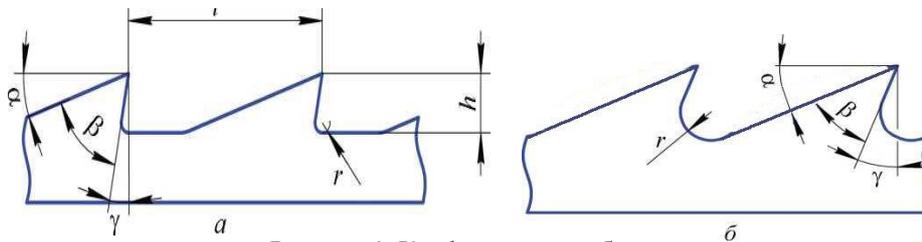


Рисунок 1. Конфигурации зубьев ленточных пил:

a - зуб типовой пилы; *b* - зуб экспериментальной пилы

Figure 1. Configurations of band saw teeth:

a - typical saw tooth; *b* - experimental saw tooth

URL: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Угол заточки зубьев ленточной пилы имеет ключевое значение для обеспечения качественного распила, поскольку неправильный угол может привести к увеличению отходов древесины, снижению точности обработки и ухудшению общего качества пилопродукции. Правильный

выбор угла заточки зубьев пил может существенно повысить качество процесса пиления за счет уменьшения износа инструмента. Эти выводы подтверждаются данными отраслевых исследований С. Donner (2019) [19].

Таблица 1

Угловые параметры профилей зубьев для полотен ленточных пил

Table 1

Angular parameters of tooth profiles for band saw blades

Тип зубьев пилы Saw tooth type	Передний угол, γ Front angle, γ	Угол заострения, β Angle of sharpening, β	Задний угол, α Back angle, α	Угол резания, δ Cutting angle, δ	Область применения Scope of application

Прямой Direct	20-15	50-55	20	70-75	Для древесины твердых пород и мерзлой или сучковатой древесины For hardwood and frozen or knotty wood
С выпуклостью With a bulge	30	40	20	60	Для древесины мягких (хвойных) пород For softwood (coniferous)

Анализ влияния углов заточки на точность распила показал, что этот параметр определяет не только качество обработки, но и производительность пиления, как показано в работах [10,16]. Повышение угла заточки увеличивает силу резания, что, в свою очередь, вызывает отклонение от заданных размеров пиломатериалов. При малых углах заточки уменьшается сопротивление материала, что способствует более плавному резанию, но при этом увеличивается износ режущей кромки. Напротив, большие углы заточки обеспечивают более устойчивую геометрию зубьев, но требуют большей силы резания. Следовательно, выбор угла заточки является компромиссом между точностью, долговечностью инструмента и усилием резания. В работе Прокофьева Г.Ф., Коваленко О.Л. (2023) [23] отмечается, что для продолжительной и надежной эксплуатации ленточных пил необходима их регулярная заточка не только для обеспечения требуемой остроты зубьев, но и для обточки межзубовых впадин с целью удаления дефектного слоя, образующегося из-за усталостных явлений.

Угол резания также оказывает существенно влияние на процесс образования волнистости. При недостаточно малом угле реза возрастает риск деформации древесины, в то время как чрезмерный угол может увеличить волнистость, а также образование разрывов и неровностей на поверхности пиломатериалов, особенно мягких древесных пород, о чем отмечено в работе [22].

Согласно действующим стандартам, качество пиломатериалов оценивают по показателям шероховатости поверхности и разнотолщинности. В этих стандартах не предусмотрены критерии оценки погрешности толщины досок вследствие волнистости пропила, поскольку они были разработаны для технологии распиловки бревен на лесопильных рамах. Однако, на практике при

распиловке лесоматериалов на ленточнопильных станках необходимо дополнительно осуществлять контроль и оценку геометрических размеров выпиливаемых пиломатериалов по величине их волнистости. Данный показатель является основным для определения номинальной толщины пиломатериалов.

Исследование факторов, влияющих на образование волнистости древесины при распиловке ленточными пилами, а также анализ методов её минимизации, позволит разработать рекомендации для повышения качества древесной продукции. Таким образом, представляется целесообразным провести исследование технологической точности распиловки бревен ленточной пилой на горизонтальном ленточнопильном станке, с целью определения критериев оценки волнистости поверхностей досок и основных факторов влияния на прямолинейность пропила.

Стандартизация форм зубьев, предусмотренная отраслевыми нормами, обеспечивает универсальность применения пил и их совместимость с различными станками, что повышает эффективность деревообрабатывающих процессов. Рациональное сочетание ширины и формы ленточной пилы является важным фактором для достижения высокой точности и качества распила. Использование пил с подходящей шириной и формой зубьев позволяет снизить энергозатраты на пиление до 15 %, а также уменьшить износ инструмента, как указывается в работе [15].

Материалы и методы

Экспериментальные исследования проводились на малогабаритном горизонтальном ленточнопильном станке модели «Спектр 70» производства ООО «Спектр» (Российская Федерация), представленном на рисунке 2.

Конфигурация режущего инструмента для обработки древесины соответствовала требованиям ГОСТ 6232-77.

Анализ волнистости поверхности пиломатериалов осуществлялся на выборке досок, полученных в результате продольной распиловки сосновых бревен длиной 3,0 м со средним диаметром 31 ± 1 см. Сравнительные испытания проводились с применением двух типов ленточных пил: серийного образца марки Vanholzer и экспериментального инструмента.

Параметры контрольного пильного полотна составляли:

- 37. геометрические размеры: $5300 \times 35 \times 1,2$ мм;
- 38. кинематические характеристики: шаг зубьев 7,8

мм;

- 39. геометрия режущей кромки: угол заострения $\beta = 53^\circ$, передний угол $\gamma = 15^\circ$, задний угол $\alpha = 22^\circ$;
- 40. параметры разводки: поочередный развод зубьев на величину 0,6 мм.

Экспериментальный образец пилы, конструкция которого защищена патентом РФ № 2817850, демонстрирует повышенные технологические характеристики при обработке древесины, обеспечивая соответствие качества пиломатериала нормативным требованиям ГОСТ 24454-80 и ГОСТ 2695-83. Визуальное представление экспериментального инструмента приведено на рисунке 3.



Рисунок 2. Выпиловка пиломатериалов на горизонтальном ленточнопильном станке «Спектр 70»

Figure 2. Sawing lumber on the horizontal band saw machine "Spectr 70"

URL: Собственное фото авторов

Source: Authors' own photo

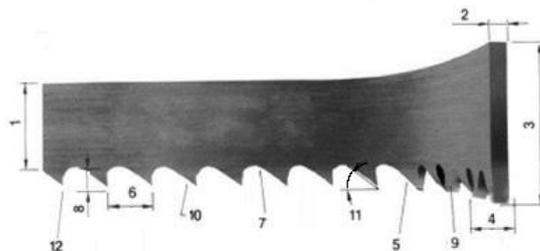


Рисунок 3. Конструктивные и геометрические характеристики экспериментальной ленточной пилы:

1 – ширина полотна пилы без учета высоты зуба; 2 - толщина полотна пилы; 3 - ширина пилы с учетом высоты зуба; 4 - развод зубьев пилы; 5 - высота зуба пилы; 6 - шаг зубьев; 7 - радиус кривизны основания канавки; 8 - расстояние от вершины зуба до дна канавки; 9 - передняя поверхность зуба; 10 - задняя поверхность зуба; 11 - задний угол зуба; 12 - передний угол зуба

Figure 3. Design and geometric characteristics of the experimental band saw: 1 - saw blade width excluding tooth height; 2 - saw blade thickness; 3 - saw width taking into account tooth height; 4 - saw tooth set; 5 - saw tooth height; 6 - tooth pitch; 7 - groove base curvature radius; 8 - distance from tooth top to groove bottom; 9 - tooth front surface; 10 - tooth back surface; 11 - tooth back angle; 12 - tooth front angle

URL: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Полотно экспериментальной ленточной пилы имело параметры: длина 5300 мм, ширина 35,5 мм (поз. 3), ширина без учета высоты зубьев 28 мм (поз. 1), толщина полотна 1 мм (поз. 2), шаг зубьев 7,39 мм (поз. 6), с разводом зубьев на сторону 0,6 мм (поз. 4), количество зубьев на один дюйм длины полотна пилы 7 шт., радиус кривизны основания канавки 5,3 мм (поз. 7), расстояние от вершины зуба до дна канавки 7 мм (поз. 8). Экспериментальный вариант конструкции ленточной пилы имел, чередующиеся основные зубья (2), выполненные прямозаточенными, и подрезные зубья (3), являющиеся сглаживающими и выполненные косозаточенными. Разность высот между основными и подрезными зубьями составляет 0,5 мм. Между основными и подрезными зубьями расположены направляющие зубья (4), высота которых равна высоте основных зубьев. Направляющие зубья выступают за пределы наружного контура ленточной пилы на величину упругого восстановления волокон древесины, равную 0,1-0,2 мм, и имеют угол бокового радиального поднутрения 40 мин. Зубья с переменным шагом развода способствуют уменьшению вибраций, что делает распил более гладким и точным. Конфигурация параметров зубьев экспериментальной пилы: высота зубьев 7,22 мм (поз. 5), передний угол $\gamma = 14^\circ$ (поз. 12), угол заострения $\beta = 40^\circ$, задний угол $\alpha = 36^\circ$ (поз. 11), передняя поверхность зуба $0,6^\circ$ (поз. 9), задняя поверхность зуба $0,6^\circ$ (поз. 11). Скорость подачи суппорта для двух вариантов пилы составила: начальная – 0,8 м/мин, рабочая – 2,2 м/ мин, скорость резания составила 35 м/с. Раскрой бревен производили острой пилой. Исследования волнистости поверхности пиломатериалов проводили на партии досок, выпиленных из сосновых бревен длиной 3,0 м и диаметром 30-32 см. Схема раскроя бревен представлена на рис. 4.

Толщина слоя b' соответствует максимальной высоте неровностей (волн) пропила. Согласно [5], для оценки точности толщины распила измеряют толщину доски в нескольких точках (рис.6). Таким способом нельзя установить величину погрешности формы пропила, поскольку результат включает в

себя высоту неравенств двух смежных пропилов (рис. 6, а).

Следовательно, нужно ввести новый показатель точности, который позволил бы определять величину кривизны пропила и был простым для измерения в производственных условиях.

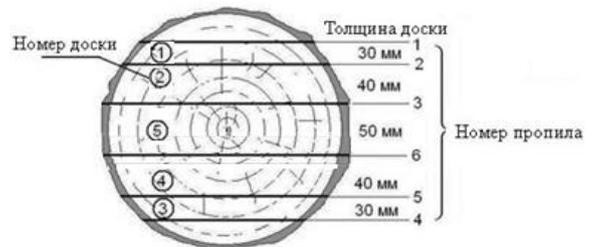


Рисунок 4. Схема раскроя бревна

Figure 4. Log cutting diagram

URL: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Анализ результатов предварительных исследований качества распиловки бревен экспериментальной ленточной пилой на горизонтальных ленточнопильных станках [1] показал, что с учетом скорости подачи суппорта, породы, температуры окружающей среды, силы натяжения пильной ленты, угла подачи и др., изменяющихся при распиловке, образуется пропил криволинейной волнообразной формы. Криволинейность пропила (рис.5) приводит к потерям древесины при последующей механической обработке. Величина этих потерь будет складываться из толщины пропила b и величины волны (толщина слоя b').

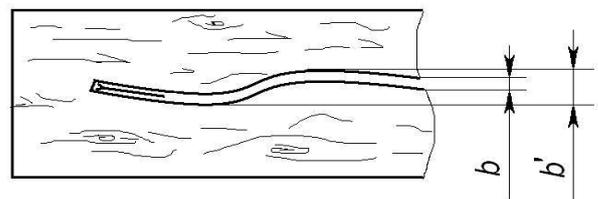


Рисунок 5. Форма кривизны пропила по длине доски

Figure 5. The shape of the curvature of the cut along the length of the board

URL: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Для оценки кривизны пропила следует измерять высоту волн одного пропила. На практике это проще всего выполнить способом измерения глубины впадин относительно некоторой прямой, касающейся наивысших точек поверхности пропила (рис. 7).

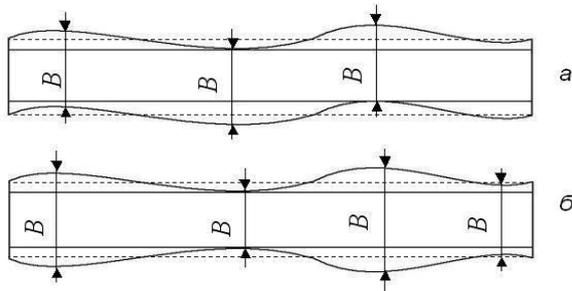


Рисунок 6. Оценка кривизны пропила путём измерения толщины

Figure 6. Estimation of the curvature of the cut by measuring the thickness

URL: собственная композиция авторов

Source: author's composition

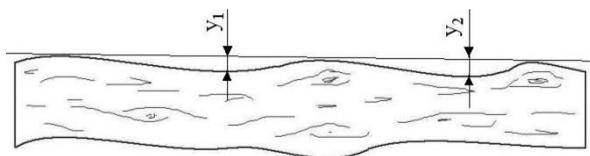


Рисунок 7. Способ измерения волнистости поверхности доски

Figure 7. Method for measuring the waviness of the board surface

URL: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Для этого доску необходимо поместить на ровную плоскость, приложить к поверхности доски проверочный брусок или линейку и замерить величину зазоров с помощью штангенциркуля или щупов. В работе измерение волнистости производили при помощи индикатора часового типа, закрепленного на стойке. Замеры производили в начале доски и далее через каждые 0,5 м. Поскольку один пропил формирует поверхности двух смежных досок, то глубина впадин на одной доске будет равна высоте соответствующих гребней волн на другой доске. Поскольку поверхность доски имеет отклонение от прямолинейности, то показатель кривизны пропила, в этом случае, по

сути и является волнистостью. Следовательно, волнистость – это показатель точности выпилки досок, характеризующий величину погрешности обработанной поверхности доски вследствие кривизны пропила.

Для практической оценки точности пропила предлагается ввести два отдельных критерия: средняя и максимальная волнистость. Средняя волнистость y_{cp} характеризует общую кривизну пропила и определяется как среднее арифметическое значение всех точек измерения

$$y_{cp} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \quad (1)$$

где N – количество замеров на одном пропиле

(или на одной стороне доски), что соответствует

числу волн по длине доски, шт;

y_i – результат i -го измерения волнистости, мм.

Потери древесины при пилении на ленточнопильных станках будут определяться не только шириной самого пропила b (рис. 5), но и величиной максимальной волнистости, определяемой выражением:

$$b' = b + y_{\max}. \quad (2)$$

Следовательно, максимальная волнистость y_{\max} является одним из показателей оценки потерь древесины при исправлении неровностей поверхностей двух смежных пиломатериалов на последующих стадиях механической обработки.

Результаты

Результаты измерения средней величины волнистости пропила приведены на рис. 8. Для анализа общей динамики величины волнистости пропила приведены также результаты замеров двух последних пропилов в конце периода стойкости пилы. Анализ результатов экспериментальных исследований показывает, что с увеличением времени наработки инструмента наблюдается увеличение как средней, так и максимальной волнистости. Больших значений волнистость достигает при пилении на последнем и предпоследнем пропилах, особенно затупленной пилой.

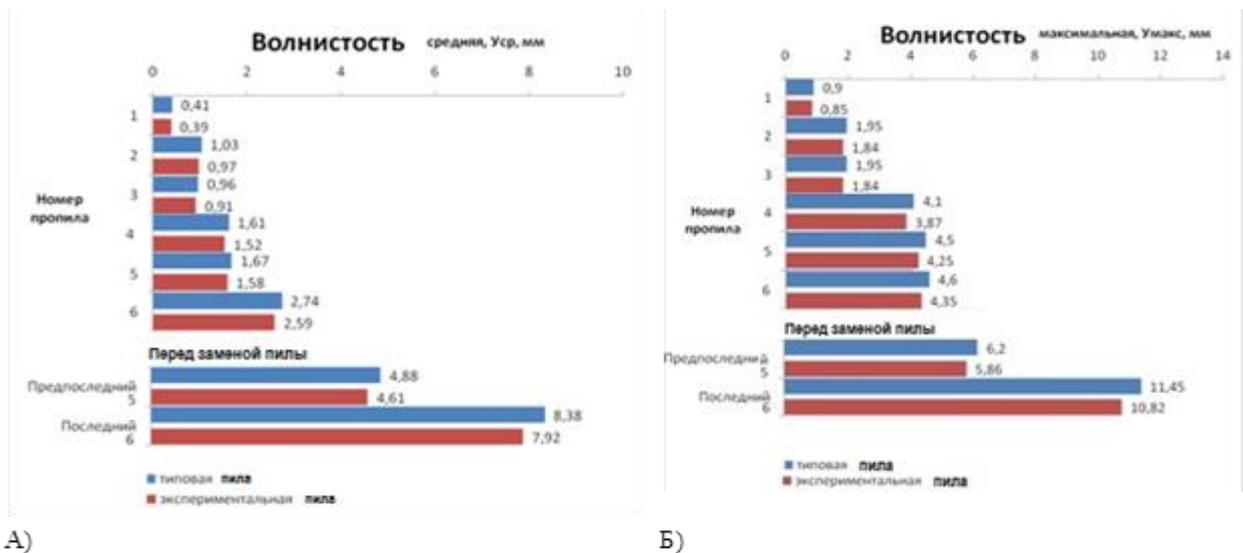


Рисунок 8. Волнистость пропила средняя (а) и максимальная (б)

Figure 8. Average (a) and maximum (b) waviness of the cut

URL: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Рисунок 8. Волнистость пропила средняя (а) и максимальная (б)

Несколько меньшее, но существенное влияние на величину и характер волнистости (рис. 6 и 7) оказывает также размещение пропила в бревне относительно ее центра.

На основании результатов исследований были определены потери древесины с учетом волнистости пропила при выпилке пиломатериалов из бревен диаметром 28-30 см, представленные в табл.4. Суммарные потери древесины от величины пропила и его волнистости δ , % определены по формуле:

$$\delta = \frac{y_{\max} + b}{B'} 100,$$

(3)

где b – ширина пропила, мм;

B' – толщина доски с учетом волнистости пропила, равная

$$B' = B + y_{\max}, \quad (4)$$

где B – номинальная толщина доски, мм.

На основании результатов исследований были определены потери древесины с учетом волнистости пропила при выпилке пиломатериалов из бревен диаметром 28-30 см,

представленные в табл.4. Суммарные потери древесины от величины пропила и его волнистости δ , % определены по формуле:

$$(3) \delta = \frac{y_{\max} + b}{B'} 100,$$

где b – ширина пропила, мм;

B' – толщина доски с учетом волнистости пропила, равная

$$B' = B + y_{\max},$$

(4)

где B – номинальная толщина доски, мм.

Анализ полученных результатов, представленных на рис. 8 и в табл. 4 показывает, что потери древесины в пропилах за счет волнистости могут многократно превышать потери от величины пропила, особенно в конце процесса раскря бревен. Наименьшая волнистость пропила отмечена на первом пропилах. В начале процесса раскря бревно имеет высокую жесткость, обусловленную круглой формой бревна. По мере выпилки пиломатериалов ширина пропила возрастает,

а жесткость бревна понижается. Это приводит к увеличению волнистости пропила более чем в 2 раза. После раскря половины диаметра бревна, его переворачивают на 180 градусов и продолжают раскря. В этом случае жесткость бревна и его устойчивость в пропиле продолжают снижаться и величина волнистости возрастает примерно в 4-5 раз. Наибольшее увеличение волнистости пропила отмечено при выпилке последних пиломатериалов. Здесь раскря подвергается уже пластина, которая имеет меньшую жесткость по сравнению с первоначальной округлой формой бревна. Использование экспериментальной пилы с измененными параметрами позволяет уменьшить величину волнистости пропила. Снижение максимальной волнистости пропила в начале раскря бревна острой пилой составляет в среднем 0,05-0,12 мм или 5,61 %, по сравнению с базовой пилой. Величина волнистости пропила в конце раскря бревна, т.е. после его поворота на 180 градусов составляет 3,87-4,35 мм. Это на 5,5 % меньше по сравнению с базовой пилой.

Затупление типовой пилы повышает величину волнистости пропила в начале раскря в 2,18 раза и в конце раскря в 1,73 раза. При использовании затупленной экспериментальной пилы величина волнистости пропила в начале раскря понижается на 7,2 % и на 6,1 % – в конце раскря бревна по сравнению с типовой пилой.

На основании анализа результатов выполненных исследований можно классифицировать факторы, влияющие на величину волнистости пропила при распиловке бревен ленточной пилой с определенными геометрическими параметрами на горизонтальном ленточнопильном станке марки «Спектр 70» и дать им общую классификацию.

Точность и прямолинейность пропила при механической обработке древесины определяются комплексом технологических и эксплуатационных факторов. Ключевое значение имеют параметры режущего инструмента. Геометрия режущей кромки, включая остроту зубьев и углы заточки, непосредственно влияет на эффективность внедрения в материал и характер

стружкообразования. Кинематические параметры зубьев, такие как шаг и равномерность разводки, определяют ширину пропила и эффективность удаления опилок. Натяжение полотна обеспечивает необходимую жесткость и демпфирование колебаний, минимизируя поперечные отклонения инструмента.

Таблица 4
Оценка величины волнистости и потерь древесины

Table 4
Evaluation of the amount of waviness and wood loss

Номер пропила Cut number	Волнистость максимальная	Экспериментальная пила Experimental saw	Величина потерь древесины в про	Экспериментальная пила Experimental saw
	Типовая пила ГОСТ 24454-80 Standard saw GOST 24454-80		Типовая пила ГОСТ 24454-80 Standard saw GOST 24454-80	
Острая пила / Sharp saw				
1	0,90	0,85	75,00	70,83
2	1,95	1,84	162,50	153,33
3	1,97	1,84	164,17	153,33
4	4,10	3,87	341,67	322,50
5	4,50	4,25	375,00	354,17
6	4,60	4,35	383,33	362,50
Затупленная пила / Dull saw				
1	2,13	1,93	177,50	160,80
2	4,10	3,80	341,67	316,67
3	4,34	4,07	361,67	339,17
4	5,13	4,73	427,50	394,17
5	6,20	5,86	516,67	488,33
6	11,45	10,82	954,17	901,67

Свойства обрабатываемого материала существенно влияют на процесс резания. Анизотропия и гетерогенность строения древесины проявляются в наличии макро- и микроструктурных неоднородностей. Свилеватость, крень, сучки, а также различная плотность ранней и поздней зон создают переменное сопротивление резанию. Физико-механические характеристики, включая

плотность, твердость и модуль упругости породы, определяют величину сил резания. Влажностный режим обрабатываемого материала влияет на его пластичность и склонность к деформациям.

Среди технологических факторов особое значение имеют режимы резания. Скорость подачи и частота вращения должны быть оптимизированы для минимизации деформаций инструмента и заготовки. Динамическая устойчивость системы "станок-приспособление-инструмент-заготовка" определяет уровень вибраций, непосредственно влияющих на качество обработки. Квалификация оператора остается критически важным фактором при работе с ручным и полустационарным оборудованием, поскольку определяет стабильность приложения усилия подачи.

Таким образом, проведенные исследования позволяют констатировать установленную количественную зависимость величины волнистости пропила от степени затупления режущего инструмента и положения пропила в обрабатываемой заготовке. Максимальные значения амплитуды колебаний наблюдаются при выполнении заключительных пропилов инструментом с критическим износом. Разработанная и апробированная усовершенствованная конструкция ленточной пилы с оптимизированными геометрическими параметрами зубьев демонстрирует устойчивое снижение величины волнистости пропила на 5,61-7,2% по сравнению со стандартным инструментом. Полученные результаты подтверждают доминирующее влияние волнистости пропила на объем технологических потерь древесины. Экспериментально доказана принципиальная возможность повышения эффективности раскря пиловочного сырья на 5-10% за счет применения разработанной конструкции ленточной пилы. Предложенные технические решения могут быть успешно внедрены в производственных условиях для оптимизации технологических процессов лесопиления.

Заключение

На основании проведенного исследования влияния геометрических параметров ленточной

пилы на точность пиления можно сформулировать следующие выводы:

1. Установлено, что волнистость пропила является ключевым параметром, определяющим точность распиловки на горизонтальных ленточнопильных станках. Экспериментально доказано, что величина волнистости возрастает по мере продвижения пропила в бревне: минимальные значения (0,85-0,90 мм) зафиксированы в начале раскря, максимальные (4,35-4,60 мм) - в конце.
2. Разработана и апробирована методика оценки волнистости пропила, включающая раздельное определение средней и максимальной волнистости. Показано, что потери древесины за счет волнистости могут в 9-12 раз превышать потери от ширины пропила, особенно при использовании затупленного инструмента.
3. Обоснованы оптимальные геометрические параметры зубьев ленточной пилы для обработки мягких пород древесины: передний угол $\gamma = 14^\circ$, угол заострения $\beta = 40^\circ$, задний угол $\alpha = 36^\circ$, переменный шаг зубьев 7,39 мм. Конструкция экспериментальной пилы с чередующимися основными и подрезными зубьями позволяет снизить величину волнистости на 7-10% по сравнению с типовыми пилами.
4. Классифицированы факторы, влияющие на точность пропила, с выделением трех основных групп: параметры режущего инструмента, свойства обрабатываемого материала и технологические условия процесса пиления. Установлено, что состояние режущего инструмента и порода древесины оказывают определяющее влияние на величину волнистости.
5. Практическая значимость работы заключается в разработке ресурсосберегающей технологии раскря лесоматериалов, позволяющей снизить расход древесины при последующей механической обработке на 5-10%. Предложенная конструкция ленточной пилы может быть эффективно использована на различных типах ленточнопильных станков.

Список литературы

1. Band Saw Blades Market: Expansion Fueled by Rising Demand in Metal Cutting, Wood Processing, and Construction Industries. Global Insight Services (GIS). – 2025. – URL: <https://linkewire.com/2025/11/20/band-saw-blades-market/>
2. Meulenberg V., Ekevad M., Svensson M. Minor cutting edge angles of sawing teeth: Effect on cutting forces in wood. *Eur. J. Wood Wood Prod.* 2022;80:1165-1173. DOI: 10.1007/s00107-022-01833-3
3. Orłowski K.A., Chuchala D., Przybylinski T., Legutko S. Recovering evaluation of narrow-kerf teeth of mini sash gang saws. *Materials.* 2021;14(23):7459. DOI: 10.3390/ma14237459
4. Анализ рынка ленточных пил в России - 2025. Показатели и прогнозы. – М.: ТЕБИЗ, 2025. – 129 с. – URL: <https://tebiz.ru/mi/rynok-lentochnykh-pil-v-rossii>
5. Мелехов В.И., Соловьев И.И., Сазанова Е.В., Пономарева Н.Г. Повышение работоспособности ленточных пил локальным теплофизическим воздействием на полотно // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2024. – № 6(402). – С. 175-183. – DOI: 10.37482/0536-1036-2024-6-175-183
6. Orłowski K.A., Chuchala D., Stenka D., Przybylinski T. Assessment of wear of the bandsaw teeth in industrial conditions. *Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen.* 2022;64(2):69-76. DOI: 10.17423/afx.2022.64.2.07
7. Repák R., Šušteršič M., Kavčič M. Impact of band saw blade thickness and width on cutting deviation in longitudinal sawing of oak wood. *Drvna Industrija.* 2023;74(3):257-266. DOI: 10.5552/drvind.2023.2245
8. Orłowski K.A., Chuchala D., Szczepanski M., Migda W., Wojnicz W. Lateral forces determine dimensional accuracy of the narrow-kerf sawing of wood. *Sci. Rep.* 2022; 12:86. DOI: 10.1038/s41598-021-04129-3
9. Erchinger F., Rapp C., Schuler T. Geometric optimization of band saw blades for improved dimensional accuracy in furniture wood processing. *Procedia CIRP.* 2023; 117:395-400. DOI: 10.1016/j.procir.2023.05.026
10. Scheidl J., Diebold J. Finite element modal analysis of moving bandsaw blades using incremental rod theory with consideration of the pre-stress distribution in the cross section. In: 95th Annual Meeting of the International Association of Applied Mathematics and Mechanics: April 7th - 11th, 2025; Poznan (Poland): Book of Abstracts. 2025. p. 102
11. Dukić I., Merhar M., Jovanović J., Herceg D. Analysis of circular saw tooth marks profile on material machined surface after filtering with Fast Fourier Transform (FFT). *Drvna Industrija.* 2022;73(2):151-162. DOI: 10.5552/drvind.2022.0011
12. Meulenberg V., Ekevad M., Svensson M., Broman O. Minor cutting edge force contribution in wood band-sawing. *J Wood Sci.* 2022;68:18. DOI: 10.1186/s10086-022-02023-8
13. Orłowski K.A., Chuchala D., Stenka D., Przybylinski T. Capacity of Surface Production of Band Sawing in Manufacture of Oak Floor Upper Layers. *BioResources.* 2023;18(2):2789-2799. DOI: 10.15376/biores.18.2.2789-2799
14. Baranski A., Prządka M., Węgrzyn R. Geometrical and technological factors affecting band saw cutting accuracy in furniture manufacturing. *Folia Forestalia Polonica. Series A – Forestry.* 2021;63(4):256-265. DOI: 10.2478/ffp-2021-0022
15. Očkaj T., Đurković I., Glavas M. Effect of band saw blade geometrical parameters on kerf quality and cutting accuracy in wood machining. *Drvna Industrija.* 2023;74(2):145-154. DOI: 10.5552/drvind.2023.2208
16. Klement P., Hlávková J., Bajzáth T. Influence of tooth geometry and blade width on the stability and accuracy of band sawing in hardwood. *Wood Research.* 2022;67(3):387-398. DOI: 10.37724/SR.2022.0029
17. Табенкин А.Н. Текстура поверхности и ее измерение. Шероховатость, волнистость, профиль, топография. — Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2021. — 234 с. — DOI 10.18720/SPBPU/2/si21-419

18. DSB Singlehead NG XM thin-cutting band saw. Wintersteiger AG. 2022. URL: <https://www.wintersteiger.com/download/?file=11925> (дата обращения: 22.11.2025)
19. Očkaj M., Đurković I., Gorišek Z. Influence of band saw blade design parameters on cutting accuracy and surface roughness in wood processing. *Wood Research*. 2024;69(1):113-124. DOI: 10.37724/WC.2024.0009
20. Němec L.K., Tippner J., Horáček P. Experimental study on the effect of blade geometry on band saw cutting performance in beech wood. *European Journal of Wood and Wood Products*. 2021;79(5):1067-1077. DOI: 10.1007/s00107-021-01701-6
21. Donner C. Band Saw Blade. 2024. URL: <https://www.bandsaege-tests.de/bandsaegeblaetter>
22. Sandak A., Sandak J., Burger M. The role of tooth geometry in band saw blade stability and cutting accuracy during hardwood ripping. *Materials*. 2022;15(18):6421. DOI: 10.3390/ma15186421
23. Прокофьев Г.Ф., Коваленко О.Л. Усталостная прочность ленточных пил // Известия вузов. Лесной журнал. – 2023. – № 4. – С. 136-145. – DOI: 10.37482/0536-1036-2023-4-136-145

Reference

1. Band Saw Blades Market: Expansion Fueled by Rising Demand in Metal Cutting, Wood Processing, and Construction Industries. Global Insight Services (GIS). 2025. URL: <https://linkewire.com/2025/11/20/band-saw-blades-market/>
2. Meulenberg V., Ekevad M., Svensson M. Minor cutting edge angles of sawing teeth: Effect on cutting forces in wood. *Eur. J. Wood Wood Prod*. 2022;80:1165-1173. DOI: 10.1007/s00107-022-01833-3
3. Orłowski K.A., Chuchala D., Przybylinski T., Legutko S. Recovering evaluation of narrow-kerf teeth of mini sash gang saws. *Materials*. 2021;14(23):7459. DOI: 10.3390/ma14237459
4. Analiz rynku lentochnykh pil v Rossii - 2025. Pokazateli i prognozy. [Analysis of the band saw blades market in Russia - 2025. Indicators and forecasts]. Moscow: TEBIZ; 2025. 129 p. (In Russ.). URL: <https://tebiz.ru/mi/rynok-lentochnykh-pil-v-rossii>
5. Melekhov V. I., Solov'ev I. I., Sazanova E. V., Ponomareva N. G. Povyshenie rabotosposobnosti lentochnykh pil lokal'nym teplofizicheskim vozdeystviem na polotno. [Improving the performance of band saw blades by local thermophysical impact on the blade]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal = Russian Forestry Journal*. 2024;6(402):175-183. (In Russ.). DOI: 10.37482/0536-1036-2024-6-175-183
6. Orłowski K.A., Chuchala D., Stenka D., Przybylinski T. Assessment of wear of the bandsaw teeth in industrial conditions. *Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen*. 2022;64(2):69-76. DOI: 10.17423/afx.2022.64.2.07
7. Repák R., Šušteršič M., Kavčič M. Impact of band saw blade thickness and width on cutting deviation in longitudinal sawing of oak wood. *Drvna Industrija*. 2023;74(3):257-266. DOI: 10.5552/drvind.2023.2245
8. Orłowski K.A., Chuchala D., Szczepanski M., Migda W., Wojnicz W. Lateral forces determine dimensional accuracy of the narrow-kerf sawing of wood. *Sci. Rep*. 2022;12:86. DOI: 10.1038/s41598-021-04129-3
9. Erchinger F., Rapp C., Schuler T. Geometric optimization of band saw blades for improved dimensional accuracy in furniture wood processing. *Procedia CIRP*. 2023;117:395-400. DOI: 10.1016/j.procir.2023.05.026
10. Scheidl J., Diebold J. Finite element modal analysis of moving bandsaw blades using incremental rod theory with consideration of the pre-stress distribution in the cross section. In: 95th Annual Meeting of the International Association of Applied Mathematics and Mechanics: April 7th - 11th, 2025: Poznan (Poland): Book of Abstracts. 2025. p. 102
11. Dukić I., Merhar M., Jovanović J., Herceg D. Analysis of circular saw tooth marks profile on material machined surface after filtering with Fast Fourier Transform (FFT). *Drvna Industrija*. 2022;73(2):151-162. DOI: 10.5552/drvind.2022.0011
12. Meulenberg V., Ekevad M., Svensson M., Broman O. Minor cutting edge force contribution in wood band-sawing. *J Wood Sci*. 2022;68:18. DOI: 10.1186/s10086-022-02023-8

13. Orłowski K.A., Chuchala D., Stenka D., Przybylinski T. Capacity of Surface Production of Band Sawing in Manufacture of Oak Floor Upper Layers. *BioResources*. 2023;18(2):2789-2799. DOI: 10.15376/biores.18.2.2789-2799
14. Baranski A., Prządka M., Węgrzyn R. Geometrical and technological factors affecting band saw cutting accuracy in furniture manufacturing. *Folia Forestalia Polonica. Series A – Forestry*. 2021;63(4):256-265. DOI: 10.2478/ffp-2021-0022
15. Očkaj T., Đurković I., Glavas M. Effect of band saw blade geometrical parameters on kerf quality and cutting accuracy in wood machining. *Drvna Industrija*. 2023;74(2):145-154. DOI: 10.5552/drvid.2023.2208
16. Klement P., Hlávková J., Bajzáth T. Influence of tooth geometry and blade width on the stability and accuracy of band sawing in hardwood. *Wood Research*. 2022;67(3):387-398. DOI: 10.37724/SR.2022.0029
17. Tabenkin A. N. Tekstura poverkhnosti i ee izmerenie. Sherokhovatost', volnistost', profil', topografiya. [Surface texture and its measurement. Roughness, waviness, profile, topography]. Saint Petersburg: Izd-vo Politekhn. un-ta; 2021. 234 p. (In Russ.). DOI: 10.18720/SPBPU/2/si21-419
18. DSB Singlehead NG XM thin-cutting band saw. Wintersteiger AG. 2022. URL: <https://www.wintersteiger.com/download/?file=11925> (дата обращения: 22.11.2025)
19. Očkaj M., Đurković I., Gorišek Z. Influence of band saw blade design parameters on cutting accuracy and surface roughness in wood processing. *Wood Research*. 2024;69(1):113-124. DOI: 10.37724/WC.2024.0009
20. Němec L.K., Tippner J., Horáček P. Experimental study on the effect of blade geometry on band saw cutting performance in beech wood. *European Journal of Wood and Wood Products*. 2021;79(5):1067-1077. DOI: 10.1007/s00107-021-01701-6
21. Donner C. Band Saw Blade. 2024. URL: <https://www.bandsaege-tests.de/bandsaegeblaetter>
22. Sandak A., Sandak J., Burger M. The role of tooth geometry in band saw blade stability and cutting accuracy during hardwood ripping. *Materials*. 2022;15(18):6421. DOI: 10.3390/ma15186421
23. Prokof'ev G. F., Kovalenko O. L. Ustalostnaya prochnost' lentochnykh pil. [Fatigue strength of band saw blades]. *Izvestiya vuzov. Lesnoy zhurnal = Russian Forestry Journal*. 2023;4:136-145. (In Russ.). DOI: 10.37482/0536-1036-2023-4-136-145

Сведения об авторах

Стародубов Александр Сергеевич – преподаватель кафедры механической технологии древесины ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0009-0007-9735-7696>, e-mail: alexoldoak@mail.ru.

✉ *Платонов Алексей Дмитриевич* – доктор техн. наук, заведующий кафедрой древесиноведения ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5941-6287>, e-mail: aleksey66@yandex.ru.

Брындина Лариса Васильевна – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории промышленных биотехнологий НИИ ИТЛК ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-2345-6789>, e-mail: bryndinv@mail.ru.

Information about the authors

Aleksandr S. Starodubov – Lecturer, Department of Mechanical Wood Technology, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva st., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0009-0007-9735-7696>, e-mail: alexoldoak@mail.ru.

✉ *Aleksey D. Platonov* – Dr. Sci. (Engineering), Head of the Chair of Wood Science, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva st., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5941-6287>, e-mail: aleksey66@yandex.ru

Larisa V. Bryndina – Dr. Sci. (Agric.), Head of the Laboratory of Biotechnologies, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-2345-6789>, e-mail: bryndinv@mail.ru.

✉ Для контактов | Corresponding author