

3. Раповец В.В. Комплексная обработка древесины фрезами со спиральным расположением сборных двухлезвийных ножей, обеспечивающая качество продукции и снижение энергозатрат: дисс. ... на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. Минск, 2011. 206 с.
4. Боровиков Е.М., Фефилов Л.А., Шестаков В.В. Лесопиление на агрегатном оборудовании. М.: Лесная пром-сть, 1985. 216 с.
5. Никишов В.Д. Комплексное использование древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1985. 264 с.
6. Гришкевич А.А., Гаранин В.Н., Бавбель И.И. Особенности нанесения износостойких покрытий методом катодно-ионной бомбардировки на твердосплавные непереключаемые пластины // Труды БГТУ. 2013. № 2.
7. Повышение эксплуатационных свойств дереворежущих ножей комбинированным методом нанесения вакуумных упрочняющих покрытий и магнитно-импульсной обработки / А.В. Алифанов, А.С. Демянчик, А.А. Лях, А.М. Милукова // Литье и металлургия. 2014 № 2. С. 95–100.
8. Раповец В.В. Повышение периода стойкости режущего инструмента фрезерно-брусующих станков при использовании твердого сплава в конструкциях двухлезвийных ножей // Труды БГТУ. Минск. 2014. С. 170–175.

УДК 674.053:621.934

В.Т. Лукаш, С.А. Гриневич
(V.T. Lukash, S.A. Grinevich)
(БГТУ, г. Минск, РБ)

E-mail для связи с авторами: lukash_valeriy@rambler.ru

**АНАЛИЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЗУБЬЕВ
ДИСКОВЫХ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ПИЛ
С ОБРАБАТЫВАЕМЫМ МАТЕРИАЛОМ**

**THE ANALYSIS OF INTERACTION OF TEETH CIRCULAR CARBIDE SAWS
WITH THE MATERIAL BEING TREATED**

Пиление является одним из основных видов механической обработки древесных плитных материалов. Обеспечение качественного раскроя в производстве мебели является актуальной задачей, для решения которой предлагаются новые профили зубьев пил, применяются современные инструментальные материалы, оптимизируются режимы обработки. При этом внедрение каждого нового профиля требует проведения дополнительных исследований с целью разработки для производства рекомендаций по их эксплуатации. Обзор инструмента, применяемого на современных мебельных предприятиях, показал, что для распиловки ламинированных древесно-стружечных плит наибольшее распространение получили дисковые пилы с комбинированными профилями зубьев: попеременно косым, плоско-трапецевидным и плоско-треугольным с вогнутой передней поверхностью. Каждый из них имеет отличительные конструктивные и функциональные особенности, поэтому авторы провели анализ каждого профиля с целью выявления его достоинств и недостатков.

Sawing is one of the main types of mechanical treatment of wood Board materials. Ensuring high-quality cutting in the production of furniture is an urgent task, which offers new profiles of saw teeth, modern tool materials are used, processing re-press optimized. At the same time, the introduction of each new profile requires additional research in order to develop recommendations for their operation. The survey instrument used in the modern furniture companies, showed that for cutting laminated chipboards the most widely circular saw

blade with the combined profiles of the teeth alternately-slanted plane of the trapezoidal and flat-triangular with concave front surface. Each of them has distinctive design and functional features, so the authors analyzed each profile in order to identify its advantages and disadvantages.

На предприятиях отрасли для раскроя древесины и древесных материалов широко используют дисковые пилы с зубьями из твердого сплава различной формы (рис. 1). Профили и угловые параметры зубьев пил достаточно разнообразны.

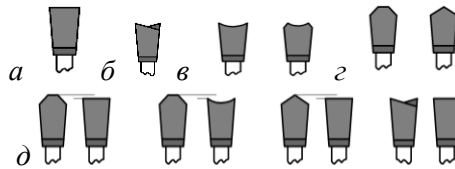


Рис. 1. Формы зубьев дисковых твердосплавных пил:

a – с прямой задней поверхностью зуба; *б* – с разносторонним наклоном; *в* – криволинейные; *г* – трапецевидная и треугольная; *д* – комбинированные

Каждый профиль зубьев имеет свои особенности взаимодействия с обрабатываемым материалом, определяемые его формой, поэтому изучение геометрии зубчатого венца и его влияния на процесс пиления (в частности, стружкообразование, силообразование и качество обработанной поверхности) представляет большой теоретический и практический интерес, так как дает необходимые сведения для проектирования дискового режущего инструмента и рациональной технологии его заточки, разработки оптимальных режимов пиления и расчета форматных станков при их конструировании.

Для раскроя облицованных древесных плитных материалов наибольшее распространение получили дисковые пилы с попеременно косым, плоско-трапецевидным и плоско-треугольным с вогнутой передней поверхностью зуба профилями режущих элементов.

На рисунке 2 приведен попеременно косой профиль зубьев. Порядок взаимодействия зубьев данного профиля с материалом представлен на рисунке 3.

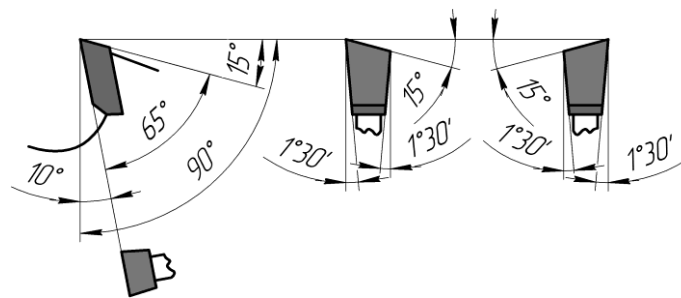


Рис. 2. Попеременно косой профиль зубьев дисковых пил

При врезании зуба в материал работает не вся главная режущая кромка, а только ее часть. Величина работающей части (длина BC) и, соответственно, объем удаляемого материала тем больше, чем больше подача на зуб S_z . По результатам измерений в программе Компас 3D-V14 площадь пропила, формируемая одним зубом при подаче на зуб $S_z = 0,06$ мм и составляет $S_{BCGA} = 0,19$ мм². Процентное соотношение объема материала, удаляемого каждым зубом из рассматриваемой комбинации, составляет 50/50.

Кроме главной, резание осуществляется и боковыми режущими кромками. Причем резание как таковое происходит лишь на отрезке CG , а боковая стенка пропила,

сформированная данным участком зуба, представляет собой ступенчатую поверхность с шагом $2S_z$ и высотой ступенек $h = 2S_z \cdot \sin \alpha_r$. Даже при максимальных из диапазона рекомендуемых производителями режущего инструмента режимах пиления ламинированных древесно-стружечных плит ($S_z = 0,06$ мм) эта величина составляет не более 7 мкм.

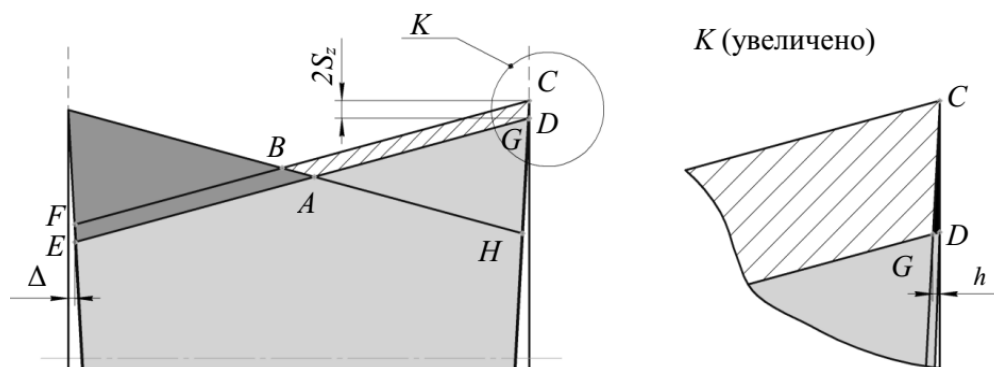


Рис. 3. Схема формирования пропила зубьями дисковой пилы с попеременно косым профилем

В виду того что только каждый второй зуб рассматриваемого профиля формирует боковые стенки пропила, силы сопротивления резанию, расположенные со смещением относительно оси полотна и составляющие сил резания по главной и боковой смежным режущим кромкам являются одним из источников поперечных колебаний пилы и приводят к ее дополнительной вибрации в пропиле, что негативно отражается на качестве обработки.

Боковые режущие кромки зубьев при вершинах F , E , H осуществляют лишь скольжение по стенке пропила ($\Delta = 0,022$ мм), сформированной предыдущими зубьями противоположного профиля (упругое восстановление волокон древесины, деформированных задней поверхностью лезвия, при торцовом резании составляет 0,05–0,12 мм, при поперечном – 0,030–0,005 мм [1]). Нормальная реакция взаимодействующей поверхности обработки частично компенсирует боковую нагрузку (совместно с боковой составляющей сил резания по главной режущей кромке) от сил резания по боковой грани на отрезке CD . Это способствует повышению устойчивости зуба и всего инструмента в пропиле, особенно по мере затупления режущего инструмента.

Благодаря наклону задней поверхности зуб пилы во время обработки будет входить в материал более плавно. Первым в материал будет внедряться острый трехгранный угол при вершине C , чем будет обеспечена локализация напряжений резания и деформаций в материале. Последнее особенно важно, так как в процессе отверждения связующего плит и облицовочный слой становятся хрупкими.

Во время пиления участки зуба, взаимодействующие с обрабатываемым материалом, будут изнашиваться. Наибольшая нагрузка при внедрении зуба в плиту будет ложиться на острый трехгранный угол, из-за чего режущие кромки, формирующие его, будут быстро терять режущую способность. Напряжения от внедрения вершины зуба будут расти по большей площади и, соответственно, вызывать деформацию и разрушение облицовочного материала.

Таким образом, на основании теоретического анализа взаимодействия попеременно косо профиля зубьев дисковой твердосплавной пилы с ламинированной древесно-стружечной плитой можно сделать вывод, что данный профиль сможет обеспечивать высокое качество обработки и малую энергоемкость процесса пиления относительно не продолжительное время. Стойкость данного инструмента будет невысокой, так как при

обработке древесно-стружечной плиты, обладающей высокой абразивной способностью, вершина трехгранного угла, выполняющая функцию подрезки поверхностного слоя материала, будет быстро изнашиваться, что приведет к появлению дефектов обработки – сколов облицовочного материала недопустимых размеров. К преимуществам пил с попеременно косым профилем зубьев следует отнести простоту изготовления и заточки, невысокое потребление мощности на резание.

Плоско-трапециевидный профиль представляет собой комбинацию зубьев дисковой твердосплавной пилы с плоской и трапециевидной формой (рис. 4).

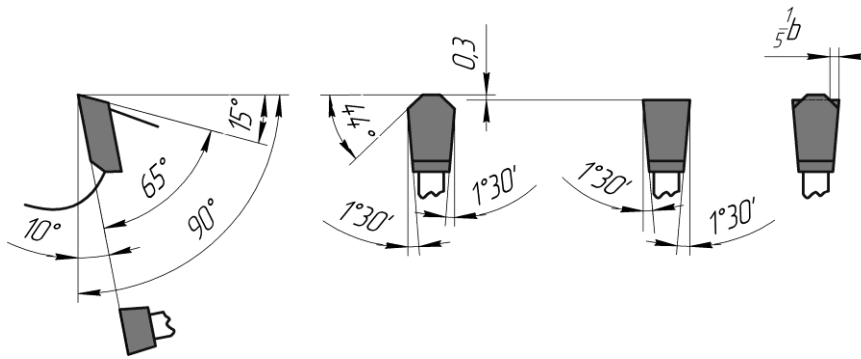


Рис. 4. Плоско-трапециевидный профиль зубьев дисковых пил

Схема взаимодействия зубьев рассматриваемого профиля с обрабатываемым материалом приведена на рисунке 5.

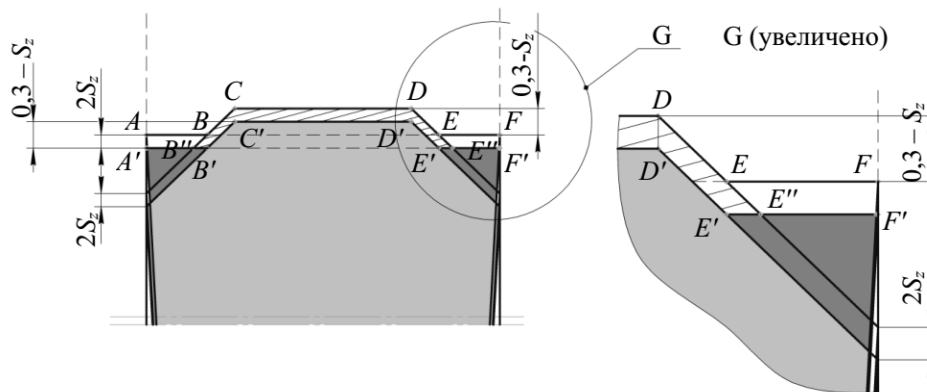


Рис. 5. Схема формирования пропила зубьями дисковой пилы с плоско-трапециевидным профилем

Вершины зубьев трапециевидной формы расположены на 0,3 мм выше окружности вершин зубьев с плоской задней поверхностью. При пилении расстояние между резами зубьев в плоскости подачи составляет $(0,3 - S_z)$ мм. Рассмотрим последовательность входа зубьев. В некоторый момент времени после прохода зубьев трапециевидной и плоской формы будет сформирован рез $A'B'C'D'E'F'$. При проходе следующего зуба трапециевидной формы снимают площадь $B''B''CDE''E'D'C'$, выбирая паз и срезая значительную часть материала (ширина паза $B''E'' = CD + 2 \cdot (0,3 + S_z) \cdot \text{tg}44^\circ$).

Исходя из конструктивного исполнения плоско-трапециевидного профиля (см. рис. 4), определим величину CD :

$$CD = \frac{3}{5}b - 2 \cdot 0,3 \cdot \text{ctg}44^\circ = \frac{3}{5} \cdot 3,2 - 2 \cdot 0,3 \cdot \text{ctg}44^\circ = 1,30 \text{ мм.} \quad (1)$$

Тогда при подаче на зуб $S_z = 0,06$ мм ширина паза $B''E''$ составит:

$$B''E'' = 1,30 + 2 \cdot (0,3 + 0,06) \cdot \operatorname{tg}44^\circ = 2 \text{ мм.} \quad (2)$$

Боковые поверхности зубьев трапецевидной формы подчищают стенки пропила, обеспечивая функцию центрирования зуба и инструмента в целом.

Следующий за ним зуб с плоским профилем срезает площади $A'ABB''$ и $F'FEE''$. Ширина обработки:

$$AB = EF = \frac{b - CD}{2} - (0,3 - S_z) \cdot \operatorname{tg}44^\circ; \quad (3)$$

$$AB = EF = \frac{3,2 - 1,30}{2} - (0,3 - 0,06) \cdot \operatorname{tg}44^\circ = 0,72 \text{ мм.} \quad (4)$$

По результатам измерений в программе Компас 3D-V14 $S_{B''B''CDE''E''D''C''} = 0,23 \text{ мм}^2$, $S_{A'ABB''} = S_{F'FEE''} = 0,075 \text{ мм}^2$. Процентное соотношение объема материала, удаляемого каждым зубом в паре «плоский/трапецевидный», составляет 40/60.

Таким образом, зубья с плоским профилем не несут существенной нагрузки и служат для окончательного формирования стенок пропила, они определяют качество обработки. Участки профиля AB и EF врезаются в материал одновременно по всей ширине. Благодаря незначительному объему удаляемого материала и наличию свободного пространства для деформирования и отвода продуктов разрушения материала на боковые стенки пропила будет оказываться меньшее давление. С точки зрения энергопотребления данный профиль будет более энергоемким по сравнению с предыдущим, так как его грани врезаются в материал одновременно. В то же время за счет отсутствия острых углов данный профиль будет изнашиваться медленнее, что обеспечит более высокую стойкость инструмента.

На основании теоретического анализа взаимодействия дисковых пил с плоско-трапецевидным профилем зубьев с обрабатываемым материалом можно сделать следующее заключение. Данный профиль будет обеспечивать высокое качество пропила за счет того, что зубья с плоским профилем, его формирующие, не несут больших нагрузок и снимают незначительный слой материала, в то время как основная нагрузка ложится на зубья с трапецевидным профилем. Пилы с плоско-трапецевидным профилем зубьев будут более энергоемкими, однако их стойкость за счет отсутствия острых углов будет выше. Плоско-треугольный профиль с вогнутой передней поверхностью зубьев представлен на рисунке 6.

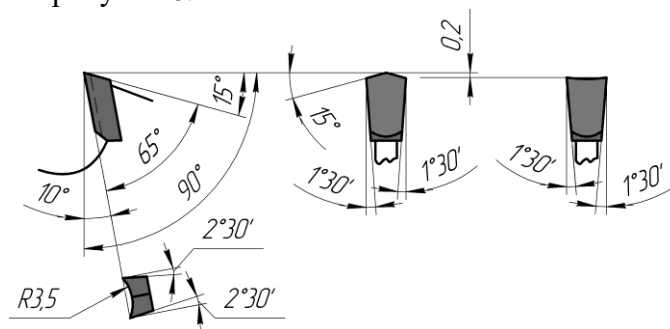


Рис. 6. Плоско-треугольный профиль зубьев дисковых пил с вогнутой передней поверхностью

Основное отличие рассматриваемого профиля от предыдущих – вогнутая поверхность передней грани зубьев, что вносит некоторые особенности в процесс стружкообразования. Схема взаимодействия зубьев плоско-треугольного профиля с обрабатываемым материалом приведена на рисунке 7.

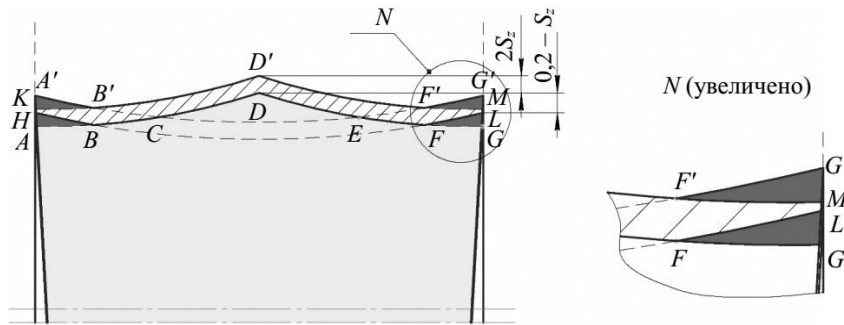


Рис. 7. Схема формирования пропила зубьями дисковой пилы с плоско-треугольным профилем

Принцип работы рассматриваемой комбинации зубьев аналогичен паре «плоский/трапециевидный»: вершины зубьев треугольной формы, расположенные на 0,2 мм выше вершин зубьев с плоским профилем, врезаются в обрабатываемый материал практически по всей ширине пропила и удаляют основную часть припуска, плоские зубья при этом выполняют роль подрезателей.

Расстояние между резами треугольного и плоского зубьев в плоскости подачи составляет $(0,2 - S_z)$ мм. После прохода пары зубьев формируется рез $HBCDEFL$. При проходе очередного зуба с треугольным профилем снимается значительная часть материала, равная площади фигуры $KD'MFDBH$. Следующий за ним зуб с плоским профилем срезает значительно меньшую площадь $A'B'K$ и $F'G'M$ и не несет существенной нагрузки.

По результатам измерений в программе Kompas 3D-V14 $S_{KD'MFDBH} = 0,34 \text{ мм}^2$, $S_{A'B'K} = S_{F'G'M} = 0,02 \text{ мм}^2$. Процентное соотношение объема материала, удаляемого каждым зубом в паре «плоский/треугольный», составляет 10/90. Однако зона пропила, удаляемая плоским зубом, при любых подачах из диапазона рекомендуемых ($S_z = 0,02 - 0,06$ мм) не перекрывает зону формирования пропила треугольным зубом. За качество обработки отвечают оба зуба из пары в отличие от попеременно косоугольного профиля, где зубья формируют пропил поочередно, или плоско-трапециевидного, только плоские зубья его выполняют чистовой рез.

Меньший угол резания боковых режущих кромок благодаря вогнутой передней поверхности зубьев плоско-треугольного профиля ($\delta_1 \approx 67^\circ 30'$) позволяет уменьшить давление в месте внедрения их в обрабатываемый материал и деформацию отделяемых частиц древесины у стенок пропила. Продукты разрушения обрабатываемого материала в процессе резания перемещаются к центру зуба, не создавая в зоне резания повышенного трения и повторного перерезания частиц, и свободно удаляются за счет дополнительного объема в середине зуба.

Для зубьев с вогнутой передней поверхностью характерно также то, что надрезание облицовочного материала и частиц древесины у стенок пропила опережает их отделение главной стружкообразующей режущей кромкой.

Сформированная при заточке передней и задней поверхности зубьев главная режущая кромка при пилении внедряется в материал с запаздыванием, не одновременно

по всей длине, а постепенно от крайних точек к центру зуба под небольшим углом к волокнам, аналогично резанию лезвием, повернутым в плане.

Более плавный вход боковых режущих кромок зубьев в обрабатываемый материал обеспечивает снижение сил, мощности и удельной работы резания [2, 3]. Отмеченные особенности конструкции позволяют улучшить результаты распиловки и значительно уменьшить вероятность появления и размеры сколов на выпиленных деталях.

Выводы

На основании проведенного теоретического анализа можно сделать следующие выводы: плоско-треугольный профиль зубьев с вогнутой передней поверхностью обеспечивает при пилении высокое качество обработки за счет того, что каждый зуб в рассматриваемой комбинации формирует боковые стенки пропила; стойкость дисковых пил с плоско-треугольным профилем зубьев больше чем с попеременно косым, но меньше чем с плоско-трапециевидным. Плоско-треугольный профиль зубьев с вогнутой передней гранью более энергоемкий чем попеременно косой, но менее энергоемкий чем плоско-трапециевидный.

Первое утверждение объясняется большим количеством зубьев, формирующих стенки пропила, второе – меньшими углами резания боковых режущих кромок зубьев, третье – наиболее неравномерным распределением подачи на зуб в паре.

Стоит отметить, что при одной и той же подаче на зуб (в нашем случае расчеты производились для $S_z = 0,06$ мм) суммарная площадь пропила, формируемая парой зубьев, одинакова для всех трех рассматриваемых профилей – $S = 0,38$ мм². Однако процентное соотношение объема материала, удаляемого каждым зубом в паре, существенно отличается, что влияет на продолжительность и энергоэффективность работы каждого из рассматриваемых профилей.

Анализ взаимодействия рассмотренных профилей зубьев дисковых пил с обрабатываемым материалом позволил предположить, что плоско-трапециевидный профиль обеспечивает при пилении ламинированных древесно-стружечных плит наибольшую технологическую стойкость (стойкость по критерию качества обработки), а попеременно косой профиль является наименее энергоемким, что было подтверждено результатами экспериментальных исследований [4, 5].

Библиографический список

1. Бершадский А.Л. Резание древесины. Минск: Выш. шк., 1975. 303 с.
2. Ивановский Е.Г., Василевская П.В., Лаутнер Э.М. Фрезерование и пиление древесины и древесных материалов. М.: Лесн. пром-сть, 1971. 96 с.
3. Любченко В.И. Резание древесины и древесных материалов: учеб. пособие [для вузов]. М.: Лесн. пром-сть, 1986. 296 с.
4. Лукаш В.Т., Гриневич С.А. Сравнительный анализ влияния профиля зубьев твердосплавных дисковых пил на технологическую стойкость и мощность при раскросе ламинированных древесно-стружечных плит // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века: труды VI Международн. евразийск. симпозиума. Екатеринбург: ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», 2011. С. 286–294.
5. Лукаш В.Т., Гриневич С.А. Технологическая стойкость дисковых пил с плоско-треугольным профилем зубьев с вогнутой передней гранью при раскросе ламинированных древесно-стружечных плит // Лесная и деревообраб. пром-сть: труды БГТУ. 2014. № 2. С. 167–170.