

А.А. Лебедев, А.В. Сергеевичев, М.А. Дедерер

**АНАЛИЗ УСЛОВИЙ И ХАРАКТЕРА СТРУЖКООБРАЗОВАНИЯ
ПРИ ШЛИФОВАНИИ ДРЕВЕСИНЫ
В УСЛОВИЯХ ЧАСТИЧНОЙ САМОЗАТАЧИВАЕМОСТИ
АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА**

Введение. Согласно современного представления об абразивном инструменте [Виноградов, Сорокин, 1995; Островский, 1984; Cai, Feng, Jin, Gong, 2002] его специфические особенности заключаются в отсутствии сплошной режущей кромки, имеющейся у любого лезвийного инструмента, наличии неправильной геометрической формы абразивных зерен с округленными вершинами, что обуславливает отрицательные передние углы резания. Для понимания физической сущности процесса шлифования древесины необходимо иметь совокупное представление о геометрических формах зерен, как протекает процесс снятия стружки, какая система сил действует на абразивное зерно и т. д.

В зависимости от глубины внедрения абразивных зерен происходят различные явления.

Рассматривая каждое отдельное абразивное зерно как элементарный резец, процесс стружкообразования при шлифовании можно описать по аналогии с работой лезвийного инструмента [Санев, Каменев, Сергеевичев, 2018; Brinksmeier, 2006; Nguyen, Butler, 2008], для которого установлено, что при отделении каждого элемента сначала происходит вдавливание острия резца, и это сопротивление, постепенно увеличиваясь, достигает своего максимума при скалывании элемента. Затем сопротивление мгновенно падает до минимума и начинает заново расти.

Опыты по резанию древесины [Переладов, Камкин, 2015; Хватов, Зубков, Родина, 2012] вдоль волокон элементом, имитирующим единичное абразивное зерно, показали, что уже при отрицательном переднем угле резания 50° не происходит срезания стружки, а наблюдается лишь упруго-пластическая деформация древесины.

Углы при вершинах зерен электрокорунда колеблются в пределах $40\text{--}145^\circ$, при этом количество зерен с острыми углами менее 90° составляет примерно $25\text{--}30\%$, а с углами более 90° соответственно $75\text{--}70\%$ [Carrano, James, 2005].

Таким образом, в резании участвует приблизительно 30% зерен. Также часть абразивных зерен из числа, находящихся в зоне резания, не используется, так как попадает на уже срезанные участки поверхности.

По данным исследователей [Sergeevichev, Belonogova, Sergeevichev, Vyzov, Mikhailova, 2020] номинальное число зерен на 1 мм^2 поверхности абразивного материала из электрокорунда составляет: зернистость 16 – 23 шт., 25 – 10 шт., 40 – 6 шт.

Методика исследования. В процессе абразивного резания древесины поперек волокон участие всех режущих зерен не равноценно. Данное явление можно объяснить тем, что часть зерен совершает работу перерезания волокон, в результате чего для другой части зерен остается лишь преодолевать сцепление между волокнами, т. е. произвести работу элементарного скалывания. Таким образом, часть зерен совершает закрытое резание, так же как и при поперечном пилении дисковыми пилами, а часть зерен участвует в открытом резании поперек волокон.

Как видно из рис. 1, при поперечном резании резцом приходится производить разрушение древесины не только основной режущей кромкой лезвия cc' , но также и боковыми режущими кромками ic и i_1c' , перерезающими волокна.

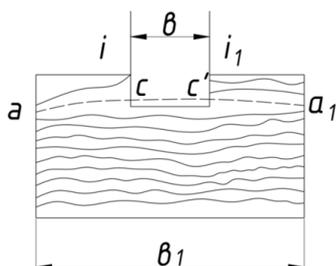


Рис. 1. Схема закрытого резания
Fig. 1. The scheme of closed cutting

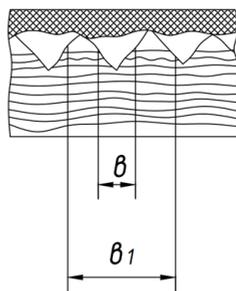


Рис. 2. Схема поперечного шлифования древесины
Fig. 2. The scheme of transverse grinding of wood

Как известно из теории резания древесины, волокна оказывают значительное сопротивление при их перерезании, отчего они обычно разрушаются не в месте соприкосновения с боковыми режущими кромками ic и i_1c' , а в зоне несколько удаленной от этих кромок.

Причем, если ширина обрабатываемого изделия B_1 только в два раза больше длины главной режущей кромки лезвия cc' резца, то стружка отрывается резцом по всей ширине aa_1 изделия. Данный момент объясняет особенность работы абразивных зерен, на пути которых оказываются уже подрезанные участки древесины, рис. 2.

Как видно из рис. 2, при поперечном шлифовании древесины часть зерен находится в условиях, когда $b \geq B_1/2$.

При шлифовании древесины вдоль волокон удаляется только некоторая часть древесины, находящаяся перед зернами. Из-за преобладания зерен с тупыми углами часть древесины не срезается, а оттесняется по краям царпин в направлении, перпендикулярном вектору скорости резания.

Таким образом, если в резании участвует одно и то же количество зерен при одинаковой глубине их внедрения в древесину, то при резании поперек волокон объем снимаемой древесины будет значительно большим, чем при продольном резании.

На основании исследований [Калинин, 2006] можно сделать вывод, что с переходом от продольного резания к поперечному суммарная сила резания не сильно возрастает, так как часть зерен при поперечном резании совершает легкую работу по скалыванию подрезанных с двух сторон волокон древесины.

Применительно к процессу шлифования древесины используется схема (рис. 3) для определения геометрических соотношений между действующими силами в системе *резец (зерно) – дерево*.

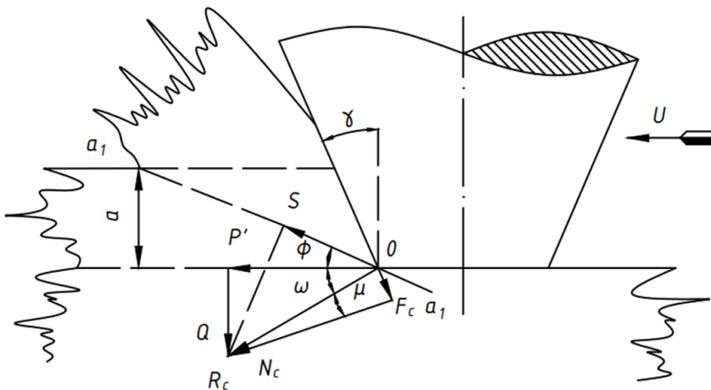


Рис. 3. Схема для определения геометрических соотношений между действующими силами в системе *резец – дерево*

Fig. 3. The scheme for determining the geometric relationships between the acting forces in the *cutter-wood* system

Абразивное зерно принято упрощенной формы, так как его вершинная часть, ограниченная некоторой частью радиуса R , не принимает участия в срезании стружки. Это происходит из-за того, что у вершин зерен передний угол резания близок к 90° . Вместе с тем острота вершинной части зерен обуславливает глубину их врезания в обрабатываемый материал под действием нормального к поверхности резания давления. Поэтому вершинная часть зерна под действием нормального давления совершает работу трения.

На схеме рис. 3 возникающая при взаимодействии резца с древесиной неравномерно распределенная нагрузка может быть заменена сосредоточенной силой R_c . Замыкает треугольник сил сила отжима Q . В результате сцепления передней грани резца с отделяемой стружкой возникает сила трения F_c , которая вместе с нормальной силой N_c дают равнодействующую R_c .

В процессе резания срезаемая стружка поднимается по передней грани резца до момента, пока проекция силы резания $F_{рез}$ на переднюю грань резца не станет равной или меньше силы трения F_c , после чего произойдет сдвиг стружки в плоскости $a-a_1$. Положение этой плоскости определяется углом сдвига φ .

Примем в качестве критерия прочности древесины предел пластического течения $\sigma_{пт}$, тогда можно использовать следующую формулу для теоретического определения силы резания:

$$F_{рез} = \sigma_{пт} \frac{A}{\sin \varphi} \frac{\cos(\mu - \gamma)}{\cos(\mu - \gamma + \varphi)} + F_{тр}, \quad (1)$$

где $\sigma_{пт}$ – предел пластического течения вдоль волокон; A – удельная производительность абразивного инструмента; $F_{тр}$ – сила трения абразивного инструмента с древесиной, $F_{тр} = fq$; φ – угол сдвига; μ – угол трения между передней гранью резца и стружкой; γ – передний угол.

Поскольку в резании участвуют только вершины с $\gamma \leq 45^\circ$, то при $\gamma = 45^\circ$, выражение

$$\alpha = \frac{1}{\sin \varphi} \cdot \frac{\cos(\mu - \gamma)}{\cos(\mu - \gamma + \varphi)} \quad (2)$$

будет представлять собой постоянную величину, равную $\alpha = 6,13$.

Подставим (2) в (1):

$$F_{рез} = \alpha \sigma_{пт} A + fq. \quad (3)$$

Формула (3) применима для определения касательной силы резания P_z при резании вдоль волокон. Для использования данной формулы при поперечном резании необходимо провести анализ составляющих α и $\sigma_{п.т}$. Из выражения (3) видно, что составляющая α является функцией угла сдвига φ . На основании исследований [Гришкевич, Костюк, 2015] известно, что наиболее простой и достаточно точный метод определения угла сдвига – через усадку стружки.

Применительно к поперечному шлифованию получить достоверное значение составляющей α не представляется возможным из-за сложности определения усадки стружки. Как известно из теории резания древесины, при резании единичным резцом, имитирующим абразивное зерно, основным видом разрушающей деформации в процессе закрытого резания поперек волокон является деформация перерезания. Работа резания в этом случае представляет собой сумму работы перерезания волокон и работы сил трения.

Тогда касательная сила резания P_z может быть представлена в следующем виде:

$$P_z = (\tau_w F_{cp} + qf) F_k, \quad (4)$$

где τ_w – предел прочности при перерезании поперек волокон; F_{cp} – площадь поверхности среза; q – нагрузка в зоне резания; f – коэффициент трения, $f = 0,4$; F_k – площадь контакта абразивного инструмента с древесиной.

Следует отметить, что при сравнении теоретических данных с результатами экспериментальных исследований выявлено: чем больше зернистость абразивного инструмента, тем больше разница значения касательной силы резания.

Данную ситуацию можно объяснить следующим образом: при поперечном шлифовании с ростом зернистости производительность инструмента увеличивается непропорционально росту силы резания. Явления попутного скалывания материала, которые характерны для поперечного шлифования, особо заметно проявляются для крупнозернистого инструмента, поэтому формулу (4) вполне можно использовать для предварительных расчетов касательной силы резания с применением поправочных коэффициентов при поперечном шлифовании древесины.

Результаты исследования. Под износом абразивного инструмента понимается истирание и выкрашивание абразивных зерен из связки под действием механических сил и температурных напряжений, а также адгезионный износ.

Температурные напряжения в процессе шлифования древесины не оказывают заметного влияния на износ абразивных зерен, термостойкость которых значительно превосходит критическую температуру нагрева древесины (200 °С). Гораздо большее значение имеет механический износ, следствием которого является истирание режущих кромок, а также выкрашивание как части, так и целого зерна в результате усталостных напряжений.

Преимущественным видом износа абразивного инструмента при шлифовании древесины является адгезионный износ. Под действием сил адгезии происходит налипание мельчайших древесных стружек к поверхности абразивных зерен. В процессе резания происходит внедрение абразивных зерен в обрабатываемый материал, в результате чего налипшие частицы древесины частично снимаются с вершин зерен и заполняют постепенно все межзерновое пространство, т. е. засаливают поверхность инструмента. В результате абразивный инструмент теряет свою работоспособность прежде, чем произойдет хотя бы частичный механический износ абразивных зерен.

Наиболее интенсивно адгезионный износ протекает при шлифовании влажной смолистой древесины. Так, при шлифовании сосны износостойкость абразивного инструмента в 2 раза ниже, чем при шлифовании лиственных пород древесины. В условиях адгезионного износа мелкозернистые шкурки, имеющие незначительный объем межзернового пространства, оказываются менее износостойкими, в сравнении с крупнозернистыми шкурками.

Однако если износ инструмента происходит в условиях частичного затупления и частичного самозатачивания, то износ возрастает с увеличением зерна. Данное явление можно объяснить тем, что зерна крупнозернистого инструмента, имеющегося на единице площади меньшее количество зерен, по сравнению с мелкозернистым инструментом, проникают в обрабатываемый материал на большую глубину, следовательно, воспринимают большее напряжение.

Поскольку шлифовальная шкурка представляет собой однослойный абразивный инструмент, то крупнозернистые шкурки в условиях самозатачивания могут оказаться менее износостойкими из-за более интенсивной потери зерен и появления открытых участков шкурки.

В случае работы абразивного инструмента с преимущественным засаливанием основным критерием износостойкости является удельная производительность шлифования, так как качество поверхности по мере износа инструмента не только не ухудшается, но даже имеет тенденцию к улучшению. При шлифовании древесины поперек волокон абразивный инструмент способен работать более длительное время и с более высокой произ-

водительностью. Но поскольку процесс износа в данном случае сопровождается выкрашиванием зерен, то на поверхности шкурки могут появиться открытые участки, что с одной стороны приводит к некоторому снижению производительности шлифования, а главное – к ухудшению качества обработанной поверхности.

Выводы.

1. На основе проведенного анализа процесса шлифования древесины можно сделать вывод, что процессу затупления абразивного инструмента сопутствует частичное самозатачивание, которое увеличивается с ростом зернистости.

2. В качестве критерия износостойкости абразивного инструмента следует принять ухудшение качества обработанной поверхности или связанное с ухудшением качества снижение производительности шлифования.

3. Второй этап работы абразивного инструмента характеризуется устойчивой работой до тех пор, пока постепенные количественные изменения инструмента из-за засаливания поверхности или потери зерен не перейдут в скачкообразные качественные изменения шлифующих свойств данного абразивного инструмента.

Библиографический список

- Виноградов В., Сорокин Г.* Абразивное изнашивание. М., 1995. 224 с.
- Гришкевич А.А., Костюк О.И.* Увеличение периода эксплуатации шлифовального инструмента при обработке древесины // *Машиностроение и машиноведение.* Минск: БарГУ, 2015. №3. С 17–21.
- Калинин Е.П.* Теория и практика управления производительностью абразивной обработки с учетом затупления инструмента. СПб., 2006. 40 с.
- Островский В.И.* Теоретические основы процесса шлифования. Л., 1984. 142 с.
- Переладов А.Б., Камкин И.П.* Определение режима изнашивания инструмента при шлифовании // *Известия ВолгГТУ,* 2015. № 3. С. 24–29.
- Санев В.И., Каменев Б.Б., Сергеевичев А.В.* Резание древесины и древесных материалов. СПб, 2018. 456 с.
- Хватов Б.Н., Зубков Д.В., Родина А.А.* Исследование производительности шлифования абразивным инструментом с самозатачивающимся зерном // *Вестник ТГТУ,* 2012. Т.18. № 4. С.1031–1037.
- Brinksmeier E.* Advances in Modeling and Simulation of Grinding Processes // *CIRP Annals – Manufacturing Technology.* 2006. Vol. 55, ch. 2. P. 667–696.
- Cai G., Feng B, Jin T., Gong Y.* Study on the friction coefficient in grinding // *Journal of Materials Processing Technology.* 2002. Vol. 129. P. 25–29.

Carranoa A and James B 2005 Geometric Modeling of Engineered Abrasive Processes. // *Taylor Journal of Manufacturing Processes*. Vol. 7, ch. 1. P. 17–27.

Nguyen A.T., Butler D.L. Correlation of grinding wheel topography and grinding performance: A study from a viewpoint of three-dimensional surface characterization // *Journal of Materials Processing Technology*. 2008. Vol. 208. iss. 1-3. P. 14–23.

Sergeevichev A., Belonogova N., Sergeevichev V., Byzov V., Mikhailova A. Investigation of the influence of certain factors on the quality of processing during hard grinding // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 5th Pan-Russian Scientific Technical Conference on Forests of Russia: Policy, Industry, Science and Education; St. Petersburg. State Forest Technical University. FR. IOP Publishing Ltd. 2020. Vol. 574(1). 9 p. DOI: 10.1088/1755-1315/574/1/012072.

References

Vinogradov V., Sorokin G. Abrasive wear. M., 1995. 224 p. (In Russ.)

Grishkevich A.A., Kostyuk O.I. Increasing the service life of the grinding tool when processing wood. *Mechanical Engineering and Engineering Science*, 2015, no. 3, pp. 17–21. (In Russ.)

Kalinin E.P. Theory and practice of abrasive performance management taking into account the bluntness of the tool. SPb., 2006. 40 p. (In Russ.)

Ostrovsky V.I. Theoretical foundations of the grinding process. L., 1984. 142 p. (In Russ.)

Pereladov A.B., Kamkin I.P. Determination of the wear mode of the tool during grinding. *Izvestiya VolgGTU*, 2015. no. 3, pp. 24–29. (In Russ.)

Sanev V.I., Kamenev B.B., Sergeevichev A.V. Cutting wood and wood materials. SPb., 2018. 456 p. (In Russ.)

Khvatov B.N., Zubkov D.V., Rodina A.A. Investigation of grinding performance with an abrasive tool with self-sharpening grain. *Bulletin of TSTU*, 2012, vol. 18, no. 4, pp. 1031–1037.

Brinksmeier E Advances in Modeling and Simulation of Grinding Processes. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2006, vol. 55, ch. 2, pp. 667–696.

Cai G., Feng B, Jin T., Gong Y. Study on the friction coefficient in grinding. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, vol. 129, pp. 25–29.

Carranoa A., James B Geometric Modeling of Engineered Abrasive Processes. *Taylor Journal of Manufacturing Processes*, 2005, vol. 7, ch. 1, pp. 17–27.

Nguyen A.T., Butler D.L. Correlation of grinding wheel topography and grinding performance: A study from a viewpoint of three-dimensional surface characterization. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, vol. 208, iss. 1-3, pp. 14–23.

Sergeevichev A., Belonogova N., Sergeevichev V., Byzov V., Mikhailova A. Investigation of the influence of certain factors on the quality of processing during hard grinding. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 5th Pan-

Russian Scientific Technical Conference on Forests of Russia: Policy, Industry, Science and Education; St. Petersburg. State Forest Technical University. FR. IOP Publishing Ltd., 2020, vol. 574(1). 9 p. DOI: 10.1088/1755-1315/574/1/012072.

Материал поступил в редакцию 05.09.2022

Лебедев А.А., Сергеевичев А.В., Дедерер М.А. Анализ условий и характера стружкообразования при шлифовании древесины в условиях частичной самозатачиваемости абразивного инструмента // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2022. Вып. 240. С. 223–233. DOI: 10.21266/2079-4304.2022.240.223-233

Приведен анализ шлифования древесины поперек волокон, рассмотрены условия и характер стружкообразования, дано теоретическое определение касательной силы резания, рассмотрен характер износа шлифовальной шкурки в условиях ее частичной самозатачиваемости, обозначен критерий износостойкости. Согласно современному представлению об абразивном инструменте его специфические особенности заключаются в отсутствии сплошной режущей кромки, имеющейся у любого лезвийного инструмента, наличии неправильной геометрической формы абразивных зерен с округленными вершинами, что обуславливает отрицательные передние углы резания. Для понимания физической сущности процесса шлифования древесины необходимо иметь совокупное представление о геометрических формах зерен, как протекает процесс снятия стружки, какая система сил действует на абразивное зерно. В процессе абразивного резания древесины поперек волокон участие всех режущих зерен неравноценно. Данное явление можно объяснить тем, что часть зерен совершает работу перерезания волокон, в результате чего для другой части зерен остается лишь преодолеть сцепление между волокнами, т. е. произвести работу элементарного скалывания. Таким образом, часть зерен совершает закрытое резание, так же как и при поперечном пилении дисковыми пилами, а часть зерен участвует в открытом резании поперек волокон. В случае работы абразивного инструмента с преимущественным засаливанием основным критерием износостойкости является удельная производительность шлифования, так как качество поверхности по мере износа инструмента не только не ухудшается, но даже имеет тенденцию к улучшению. При шлифовании древесины поперек волокон абразивный инструмент способен работать более длительное время и с более высокой производительностью. Но поскольку процесс износа в данном случае сопровождается выкрашиванием зерен, то на поверхности шкурки могут появиться открытые участки, что с одной стороны приводит к некоторому снижению производительности шлифования, а главное – к ухудшению качества обработанной поверхности.

Ключевые слова: шлифование древесины поперек волокон, износ шлифовальной шкурки в условиях ее частичной самозатачиваемости.

Lebedev A.A., Sergeevichev A.V., Dederer M.A. Analysis of the conditions and nature of chip formation when grinding wood under conditions of partial self-sharpening of the abrasive tool. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskaj Akademii*, 2022, iss. 240, pp. 223–233 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2022.240.223-233

The article analyzes the grinding of wood across the fibers, considers the conditions and nature of chip formation, provides a theoretical definition of the tangential cutting force, considers the nature of the wear of the sandpaper under conditions of its partial self-sharpening, and the wear resistance criterion. According to the modern concept of an abrasive tool, its specific features are the absence of a solid cutting edge that any bladed tool has, the presence of an irregular geometric shape of abrasive grains with rounded tops, which causes negative cutting angles. To understand the physical essence of the wood grinding process, it is necessary to have a general idea of the geometric shapes of the grains, how the chip removal process proceeds, what system of forces acts on the abrasive grain. In the process of abrasive cutting of wood across the fibers, the participation of all cutting grains is not equivalent. This phenomenon can be explained by the fact that some of the grains do the work of cutting the fibers, as a result of which for the other part of the grains it remains only to overcome the adhesion between the fibers, that is, to perform the work of elementary shearing. Thus, part of the grains makes a closed cut, as in the case of transverse sawing with circular saws, and part of the grains participates in open cutting across the fibers. In the case of an abrasive tool with predominant clogging, the main wear resistance criterion is the specific grinding performance, since the surface quality not only does not deteriorate as the tool wears, but even tends to improve. When sanding wood across the grain, the abrasive tool is able to work for a longer time and with higher productivity. But since the wear process in this case is accompanied by grain chipping, open areas may appear on the surface of the skin, which, on the one hand, leads to some decrease in grinding productivity, and most importantly, to a deterioration in the quality of the treated surface.

Key words: sanding wood across the grain, wear of the sanding paper under conditions of its partial self-sharpening.

ЛЕБЕДЕВ Антон Александрович – аспирант Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. ORCID: 0000-0002-5017-2113,

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: ktk@mail.ru

LEBEDEV Anton A. – postgraduate student, St.Petersburg State Forest Technical University. ORCID: 0000-0002-5017-2113
194021, Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: ktk@mail.ru

СЕРГЕЕВИЧЕВ Александр Владимирович – заведующий кафедрой прикладной механики и инженерной графики Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доктор технических наук, профессор. Researcher ID: ABC-2274-2020, ORCID: 0000-0003-3655-207X. SPIN-код: 4629-6720. Author ID: 433688

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: 910sav@gmail.com

SERGEEVICHEV Alexander V. – DSc (Technical), Professor, Head of the Department of Applied Mechanics and Engineering Graphics, St.Petersburg State Forest Technical University. Researcher ID: ABC-2274-2020, ORCID:0000-0003-3655-207X. SPIN-код: 4629-6720. Author ID: 433688

194021, Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: 910sav@gmail.com

ДЕДЕРЕВ Михаил Александрович – магистрант Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, ORCID: 0000-0002-1589-0734

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: splkexx89@gmail.com

DEDERER Mikhail A. – undergraduate student, St.Petersburg State Forest Technical University. ORCID: 0000-0002-1589-0734

194021, Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: splkexx89@gmail.com