



МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ  
И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

УДК 674.055

**АНАЛИЗ РАЗРУШЕНИЯ АБРАЗИВНЫХ ЗЕРЕН  
ПРИ ШЛИФОВАНИИ ДРЕВЕСИНЫ И ДРЕВЕСНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

© *А.В. Сергеевичев, канд. техн. наук, доц.*

С.-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, Институтский пер., д. 5, г. С.-Петербург, Россия, 193232; e-mail: 910sav@gmail.com

Шлифование выполняют в целях выравнивания поверхности после предыдущих операций и придания ей требуемой шероховатости, а также удаления слоя древесины или древесного материала для обеспечения заданного размера изделия. Изучение и определение поверхностной энергии древесины и древесных материалов является актуальной задачей современной деревообработки, связанной с образованием новых поверхностей в результате технологических процессов. Исследуемые процессы обработки деталей абразивными инструментами по описанию и моделированию являются наиболее сложными. Они характеризуются развитыми пространственно-временными связями, детальное изучение которых должно выполняться на основе системного подхода. Закономерности износа абразивного инструмента непосредственно связаны с работой единичных абразивных зерен. В основе механизма износа лежат явления адгезии, диффузии, абразивного разрушения, пластического течения тончайших поверхностных слоев, размягченных под действием высоких контактных температур и давлений, химического воздействия на абразив окружающей среды и обрабатываемого материала. Под действием механических и температурных напряжений происходит растрескивание, скалывание режущих кромок, выкрашивание из связки отдельных абразивных зерен и целых комплексов. Вероятность вырывания абразивного зерна в инструменте и его разрушения с увеличением глубины резания значительно возрастает. В этом случае почти все абразивные зерна достигают максимальной глубины резания. На вершинах абразивных зерен появляются значительные площадки износа. На основании анализа закономерностей работы единичных абразивных зерен инструмента с момента их активации до момента разрушения или вырывания из связки можно установить взаимосвязь износа абразивного инструмента с износом и закономерностями работы единичных абразивных зерен, что является неотъемлемой частью возможности совершенствования конструкций инструмента.

*Ключевые слова:* шлифование древесины и древесных материалов, шероховатость обработанной поверхности, резание, единичное абразивное зерно.

*Введение*

При шлифовании материал удаляется с обрабатываемой поверхности в зоне контакта заготовки с инструментом, которая представляет собой область

взаимного проникновения абразивных зерен инструмента в материал заготовки и гребешков материала в промежутки между вершинами абразивных зерен.

Для выражения основных зависимостей динамической модели через технологические факторы в параметрическом виде необходимо более детальное исследование взаимодействия инструмента и заготовки.

Основными источниками шероховатости при шлифовании являются: следы режущих кромок в обрабатываемом материале; пластические, упругие, температурные деформации, хрупкое разрушение материала поверхностного слоя; перенос на обрабатываемую поверхность частичек материала, оставшихся на режущих кромках инструмента.

При шлифовании фактор геометрического копирования часто является преобладающим. Шероховатость образуется при отображении поверхностей резания в материале заготовки. При воздействии только геометрического фактора она может быть представлена как совокупность следов единичных абразивных зерен, которые проходят через рассматриваемое сечение. Каждая единичная риска в этом случае будет копировать форму вершины единичного зерна в сечении поверхности резания плоскостью, перпендикулярной траектории движения. В связи с тем, что абразивные зерна имеют разнообразную форму, микрорельеф шлифованной поверхности, обусловленный геометрическим фактором, является нерегулярным [1].

#### *Методы исследования*

Закономерности износа абразивного инструмента непосредственно связаны с работой единичных абразивных зерен. В основе механизма износа лежат явления адгезии, диффузии, абразивного разрушения, пластического течения тончайших поверхностных слоев, размягченных под воздействием высоких контактных температур и давлений, химического влияния на абразив окружающей среды и обрабатываемого материала. Под действием механических и температурных напряжений происходит растрескивание, скалывание режущих кромок, выкрашивание из связки отдельных абразивных зерен и целых комплексов.

Механизм износа единичных абразивных зерен и явления, возникающие при контакте зерна с материалом, рассматривается в работах Т.Н. Лоладзе, Е.Н. Маслова и др. Механизм износа абразивного инструмента в целом до настоящего времени не имеет столь четкого логического представления. Для его описания весьма перспективным является использование динамических теоретико-вероятностных моделей процесса шлифования [2].

При работе инструмента не все зерна изнашиваются одинаково, что связано с изотропностью их физических свойств и различием в величине относительного износа. Износ абразивных зерен непрерывно увеличивается, затупившиеся вершины перестают резать, что приводит к снижению объема снимаемого материала и производительности процесса. Интенсификация режима

в целях сохранения производительности вызывает резкое ухудшение качества обработанных поверхностей.

Влияние технологических факторов на силы при микрорезании единичными зернами рассматривается в работах А.Н. Резникова и Н. Танака. На основании современных положений теории пластичности установлены зависимости для расчета составляющих силы резания  $P_{gy}$  и  $P_{gz}$  на единицу длины условной режущей кромки при микрорезании абразивными зернами, имеющими площадки износа:

$$P_{gy} = \left( \frac{\sqrt{3,25}a_g \sin \beta}{\sin \beta_1} + 0,5b(z) \right) \tau_s; \quad (1)$$

$$P_{gz} = \left( \frac{\sqrt{3,25}a_g \cos \beta}{\sin \beta_1} + 0,5\mu b(z) \right) \tau_s, \quad (2)$$

где  $a_g$  – глубина микрорезания единичным абразивным зерном, мкм;  
 $\beta$  – угол между равнодействующей силы резания и скоростью резания, град;  
 $\beta_1$  – угол сдвига, град;  
 $b(z)$  – ширина площадки на вершине абразивного зерна в направлении скорости резания, мкм;  
 $\mu$  – коэффициент трения;  
 $\tau_s$  – среднее касательное напряжение в плоскости сдвига, кПа.

При прохождении абразивным зерном зоны контакта заготовки с инструментом силы резания изменяются синхронно с изменением глубины микрорезания. Они увеличиваются при движении абразивного зерна от точки его входа в зону контакта к основной плоскости, достигают максимума в области отрицательных значений  $z$ , затем уменьшаются. С увеличением числа контактов зерна с материалом силы резания возрастают за счет увеличения глубины микрорезания и площадок износа [7].

Глубина микрорезания единичным зерном  $a_g$ , входящая в уравнение сил резания, отличается от ее геометрической величины  $t_g$ . Она является случайной величиной, так как абразивное зерно взаимодействует со случайным профилем микронеровностей. Задача по определению всех возможных вариантов нагружения абразивного зерна сводится к определению статических характеристик  $a_g$  и  $b(z)$  при условии, что его вершина попала на один из выступов шероховатости поверхности. Наибольший интерес при анализе процесса разрушения абразивного зерна представляют наиболее неблагоприятные условия его нагружения, когда оно попадает на один из выступов шероховатости поверхности. При расчете вероятности выпадения и разрушения абразивного зерна необходимо исходить из условия его нагружения силой, по величине близкой или равной максимально возможной  $P_{gz\max}$ . До разрушения абразивное зерно может проходить зону контакта от 800 до 3500 раз, и встреча зерна с одной из наибольших величин микропрофиля достаточно вероятна [5].

При контакте с одним из наибольших выступов шероховатости средний размер площадки износа вершины абразивного зерна в направлении скорости резания  $b(z)$  при ширине среза  $s_{gx}$  равен  $\pi s_{gx} / 4$ , средняя глубина микрорезания определяется как

$$\bar{a}_g = \frac{1}{s_{gx}} \int_0^{s_{gx}} a_g(x) dx \text{ при } a_g(x) = \begin{cases} y_g & \text{при } y_g \geq 0 \\ 0 & \text{при } y_g < 0, \end{cases} \quad (3)$$

где  $y_g$  – координата точки профиля шероховатости поверхности до площадки износа абразивного зерна.

При треугольной форме выступа шероховатости  $a_g$  вычисляется по зависимости

$$\bar{a}_g = \frac{t_{gi}}{2b_R} [2b_R - b_g(h)], \quad (4)$$

где  $t_{gi}$  – размерный износ вершины зерна, мкм;

$b_R$  – длина сечения выступа шероховатости на уровне  $t_{gi}$ , мкм;

$b_g(h)$  – ширина площадки износа при размерном износе вершины зерна, мкм.

Величина площадки износа зерна определяется по его размерному износу.

С увеличением числа касаний величина составляющих сил резания ( $P_{gy}$ ) повышается вследствие увеличения глубины резания и размеров площадки износа.

Вероятность вырывания абразивного зерна в инструменте и его разрушения с увеличением глубины резания значительно возрастает. В этом случае почти все абразивные зерна достигают максимальной глубины резания и на их вершинах появляются значительные площадки износа.

Физические основы разрушения абразивного зерна при шлифовании рассмотрены и изучены во многих работах [3, 6, 8]. Рассмотрены вопросы распространения упругих волн, выполнен анализ величины напряжений, возникающих в зерне и мостиках связки. Показано, что абразивное зерно работает в условиях высоких циклических нагрузок. Поверхностные слои зерна нагреваются в зоне контакта и охлаждаются при выходе из нее, появляются значительные термические напряжения. Все это приводит к снижению прочности зерна и прочности его закрепления в инструменте.

Статистические данные по прочности закрепления абразивных зерен при шлифовании могут быть получены методом строгания поверхности инструмента с регистрацией сил, действующих на индентор [11, 12]. Метод строгания дает обобщенную характеристику по прочности закрепления зерен в инструменте и прочности самого зерна. При строгании часть абразивных зерен выламывается из связки, часть их разрушается.

Анализ тензограмм, полученных при строгании абразивного инструмента твердосплавными резцами, показывает, что прочность закрепления единичных зерен неодинакова и является случайной величиной, распределенной по закону, близкому к нормальному.

Анализ теоретических и экспериментальных кривых показывает, что величина максимума частоты значительно зависит от твердости абразивного инструмента. С увеличением твердости значение частоты в максимуме уменьшается, среднее значение и дисперсия сил закрепления абразивных зерен увеличиваются [3].

С возрастанием твердости на одну степень прочность закрепления зерна в круге увеличивается примерно в 1,2–1,4 раза.

Если принять, что прочность закрепления абразивного зерна в инструменте распределена по закону, близкому к нормальному, то вероятность разрушения единичного зерна определится по следующей зависимости:

$$P(R_g < P_g) = \frac{1}{\sigma_R \sqrt{2\pi}} \int_0^{P_g} \exp\left(-\frac{(R_g - \bar{R}_g)^2}{2\sigma_R^2}\right) dR_g. \quad (5)$$

Вероятность вырывания абразивного зерна в круге и его разрушения с увеличением глубины резания наиболее значительно возрастает при малых глубинах микрорезания.

На основании анализа работы единичных абразивных зерен можно рассмотреть вопросы прогнозирования износа абразивного инструмента [9,10]. Для установившегося процесса шлифования, когда износ инструмента за касание постоянен, выражаем относительную глубину микрорезания единичным зерном в плоскости:

$$t_g(\tau) = \Delta R V_k \tau - h_g. \quad (6)$$

Приращение износа вершины зерна вычисляем из предположения, что за  $V_k \Delta \tau$  контактов длина резания за касание изменяется незначительно:

$$\Delta h_g = \int_{-L_g}^{L_g} h_0 P_k dz V_k \Delta \tau. \quad (7)$$

Переходя к пределу  $\Delta \tau \rightarrow 0$  и заменяя  $\frac{\Delta h_g}{\Delta \tau}$  на  $\frac{dh_g}{d\tau}$ , получаем интегро-дифференциальное уравнение износа абразивного инструмента:

$$\dot{h}_g = V_k \int_{-L_g}^{L_g} h_0 P_k dz. \quad (8)$$

Вероятность контакта вершины абразивного зерна с обрабатываемым материалом зависит от глубины микрорезания и износа зерна  $h_g$ . Для момента времени  $t = t_0 = 0$  имеем  $h_g = 0$ , что является для дифференциального уравнения (8) начальным условием.

При работе инструмента в режиме затупления размерный износ вершины зерна, наиболее приближенной к заготовке, равен износу инструмента:

$$\Delta h_{g \max} = \Delta R \text{ при } t_{g \max} = t_f. \quad (9)$$

При работе инструмента в режиме самозатачивания наиболее прочно закрепленные абразивные зерна разрушаются при максимальной глубине микрорезания:

$$R_{g \max} = P_{g \max} \text{ при } t_{g \max} = t_f. \quad (10)$$

Зависимости (9) и (10) являются граничными условиями решения дифференциального уравнения износа инструмента.

Для наглядного описания структуры зависимости (8) рассмотрим частный случай, когда вероятность контакта вершины с обрабатываемым материалом пропорциональна глубине микрорезания:

$$P_k = \frac{y-\Delta r}{t_f-\Delta r} = \frac{1}{t_f-\Delta r} \left( t_g - \Delta r - \frac{z^2}{D_0} \right);$$

$$L_p = \frac{1}{t_f-\Delta r} \int_{-L_g}^{L_g} \left( t_g - \Delta r - \frac{z^2}{D_0} \right) dz = \frac{2 \cdot 2\sqrt{D_0}}{3(t_f-\Delta r)} (t_g - \Delta r)^{3/2}; \quad (11)$$

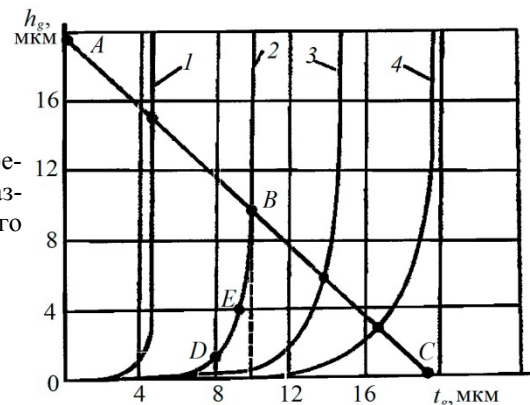
$$\dot{h}_g = \frac{2 \cdot 2h_0\sqrt{D_0}}{3(t_f-\Delta r)} (\Delta R V_k \tau - h_g - \Delta r)^{3/2} V_k \quad (12)$$

*Результаты исследования*

Скорость износа вершины абразивного зерна зависит от относительного износа  $h_0$ , скорости износа инструмента  $\Delta R V_k$ , величины самого износа и режима резания. Уравнение (12) является приближенным аналогом дифференциального уравнения износа абразивного инструмента, что позволяет рекомендовать его только для приближительных расчетов.

В системе координат  $h_g$  и  $t_g$  (см. рисунок) каждому значению скорости износа инструмента соответствует кривая (1 – 4). Точки на кривой определяют глубину микрорезания и износ зерен в момент времени  $\tau$ . При  $\tau = 0$  глубина и износ равны 0 (начальное условие для решения дифференциального уравнения (8)). При увеличении числа контактов инструмента с заготовкой увеличиваются  $h_g$  и  $t_g$ . Точка на графике, соответствующая координатам вершины зерна, перемещается по линии  $\Delta R$  в сторону прямой ABC. С увеличением глубины микрорезания и площадок износа увеличиваются силы резания (уравнения (1), (2)), что приводит к разрушению зерна [4].

Наиболее прочно закрепленное зерно (граничное условие уравнения (8)) разрушается в т. В, которая определяет максимальную глубину резания. Совокупность точек, соответствующих граничному условию (10), образует линию ABC. Для каждой глубины  $t_f$  на линии существует только одна точка,



Соотношение между глубиной микрорезания и износом вершины зерна при различных значениях износа абразивного инструмента

через которую проходит только одна кривая с определенным значением  $\Delta R$ . При увеличении твердости абразивного инструмента линия ABC перемещается в сторону увеличения значений  $h_g$  и  $t_g$  зерна. Такой инструмент при определенном значении  $\Delta R$  позволяет работать с большей глубиной микрорезания  $t_f$ , но при этом возрастает опасность появления прижогов в связи с увеличением сил резания и температуры в зоне контакта.

#### Выводы

1. Выполнен анализ закономерностей работы единичных абразивных зерен инструмента с момента их активации до момента разрушения или вырывания из связки.

2. На основании проведенного анализа можно установить взаимосвязь износа абразивного инструмента с износом и закономерностями работы единичных абразивных зерен, что является неотъемлемой частью возможности совершенствования конструкций инструмента.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Королев А.В.* Исследование процессов образования поверхностей инструментов и детали при абразивной обработке. Саратов: Саратовский ун-т, 1975. 202 с.
2. *Любимов В.Г.* Режущие свойства одиночного абразивного зерна и шлифовального круга // Лесн. журн. 1974. №5. С. 79–87. (Изв. высш. учеб. заведений).
3. *Новоселов Ю.К.* Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке. Севастополь: СевНТУ, 2012. 304 с.
4. *Новоселов Ю.К.* Оптимизация процессов шлифования деталей // Технология и организация производства. 1975. №8. С. 31–34.
5. *Резников А.Н.* Абразивная и алмазная обработка материалов: справ. М.: Машиностроение, 1977. 391 с.
6. *Рыбин Б.М., Санаев В.Г., Кириллов Д.В.* К вопросу выбора параметров шероховатости для оценки неровностей древесины // Лесн. вестн. М.: МГУЛ, 2014. №4. С. 131–137.
7. *Сергеевичев А.В.* Основные характеристики процесса шлифования древесины и древесных материалов // Изв. СПбЛТА. 2014. №206. С. 124–138.
8. *Федосеев О.Б.* Теоретические и экспериментальные исследования процесса шлифования сверхтвердыми материалами: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Тбилиси, 1976. 24 с.
9. *Daude O.* Zusammenhang zwischen Shleifscheibe, Bearbeitungsbedingungen und arbeitsergebnis beim schleifen // Jnd.-Anz. 1969. N32. P. 741–745.
10. *Gerner L.H., Burk R.E., Grummitt O.* In Frontiers In Chemistry // Interscience. 1962. N4. P. 57–65.
11. *Matsui S., Tamaki I.* Influence of the elastic displacement of grain cutting edges on grinding mechanism // Technol. Reports (Tohoku Univ). 1976. N41. P. 73–88.
12. *Tanaka Y.* Frictional properties of abrasive grains // Technol. Repots (Osaka Univ.). 1967. N17. P. 523–531.

Поступила 15.12.14

UDC 674. 055

**The Analysis of Destruction of Abrasive Grains During the Grinding of Wood and Wood Materials**

*A.V. Sergeevichev, Candidate of Engineering, Associate Professor*

St. Petersburg state forest technical university under name of S. M. Kirov, Institutsky per., 5, St. Petersburg, 193232, Russia; e-mail: 910sav@gmail.com

Grinding is carried out for the purpose of abrasion of a surface after the previous operations and of attaching the demanded roughness, and also removal of a layer of wood or wood material by it for providing the given size of a product. Studying and definition of the surface energy of wood and wood materials are actual problems of the modern woodworking, connected to formation of new surfaces as a result of technological processes. The studied processing of details by abrasive tools according to the description and model operation is the most composite. They are characterized by developed existential communications which detailed studying has to be carried out on the basis of systems approach. Regularities of a wear of the abrasive tool are directly connected with work of simple abrasive grains. The phenomenon of adhesion, diffusion, abrasive destruction, plastic flow of the shallowest surface layers softened under the influence of high contact temperatures and pressure, chemical impact on an abrasive of a surrounding medium and the processed material are fundamentally of the mechanism of a wear. Under the influence of mechanical and temperature stresses there is a cracking fissuring, shear of trimming blades, microchipping from a linking of separate abrasive grains and the whole complexes. The probability of an evulsion of abrasive grain and its destructions with increase in depth of cutting considerably increases in the tool. In this case almost all abrasive grains reach the maximal depth of cutting. At tops of abrasive grains there are considerable platforms of a wear. On the basis of the analysis of regularities of work of simple abrasive grains of the tool from the moment of their activation until destruction or an evulsion from a sheaf it is possible to establish interrelation of a wear of the abrasive tool with a wear and regularities of work of simple abrasive grains that is an integral part of possibility of perfecting of designs of the tool.

*Keywords:* grinding of wood and wood materials, a roughness of the processed surface, cutting, simple abrasive grain.

REFERENCES

1. Korolev A.V. *Issledovanie protsessov obrazovaniya poverkhnostey instrumentov i detali pri abrazivnoy obrabotke* [Research of Processes of Formation of Tools and a Detail Surfaces at Abrasive Processing]. Saratov, 1975. 202 p.
2. Lyubimov V.G. Rezhushchie svoystva odinochnogo abrazivnogo zerna i shlifoval'nogo kruga [The Cutting Properties of Individual Abrasive Grain and an Abrasive Disk]. *Lesnoy zhurnal*, 1974, no. 5, pp. 79–87.
3. Novoselov Yu.K. *Dinamika formoobrazovaniya poverkhnostey pri abrazivnoy obrabotke* [Dynamics of a Surfaces Formation at Abrasive Processing]. Sevastopol, 2012. 304 p.
4. Novoselov Yu.K. Optimizatsiya protsessov shlifovaniya detaley [Optimization of Processes of Grinding of Details]. *Tekhnologiya i organizatsiya proizvodstva*, Kiev, 1975, no. 8, pp. 31–34.



5. Reznikov A.N. *Abrazivnaya i almaznaya obrabotka materialov* [Abrasive and Diamond Processing of Materials]. Moscow, 1977. 391 p.

6. Rybin B.M., Sanaev V.G., Kirillov D.V. K voprosu vybora parametrov shero-khovatosti dlya otsenki nerovnostey drevesiny [To a Question of a Choice of Parameters of a Roughness for an Assessment of Wood Roughnesses]. *Lesnoy vestnik*, Moscow, 2014, no. 4, pp. 131–137.

7. Sergeevichev A.V. Osnovnye kharakteristiki protsessa shlifovaniya drevesiny i drevesnykh materialov [Main Characteristics of Grinding Process of Wood and Wood Materials]. *Izvestiya SPbFTU*, St. Petersburg, 2014, no. 206, pp. 124–138.

8. Fedoseev O.B. *Teoreticheskie i eksperimental'nye issledovaniya protsessa shlifovaniya sverkhтвердыми materialami: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Theoretical and Pilot Studies of Process of Grinding by Supersolid Materials: Cand.Tech.Sci.Diss.Abs.]. Tbilisi, 1976. 24 p.

9. Daude O. Zusammenhang zwischen Schleifscheibe. Bearbeitungsbedingungen und arbeitsergebnis beim schleifen. *Jnd.-Anz*, 1969, no. 32, pp. 741–745.

10. Gerner L.H., Burk R.E., Grummitt O. in *Frontiers in Chemistry. Interscience*. New York, 1962, no. 4, pp. 57–65.

11. Matsui S., Tamaki I. Influence of the elastic displacement of grain cutting edges on grinding mechanism. *Technology Reports*. Tohoky Univ, 1976, no. 41, pp. 73–88.

12. Tanaka Y. Frictional properties of abrasive grains. *Technology Reports*. Osaka Univ., 1967, no. 17, pp. 523–531.

Received on December 15, 2014

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2015.5.117

---