

## ПОДДЕРЖАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА ЗА СЧЕТ НАПРАВЛЕННОГО ЭЛЕКТРО-ЭРОЗИОННОГО РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ СВЯЗКИ

**Богущий В.Б., Тарховский А.Ю.**

*Севастопольский государственный университет, Севастополь;*

*Крымский инженерно-педагогический университет имени Февзи Якубова, Симферополь*

**Ключевые слова:** шлифование, шлифовальный круг, стабилизации процесса, металлическая связка, электро-эрозионное разрушение, математическая модель.

**Аннотация.** Статья посвящена разработке математической модели, учитывающей изменения состояния шлифовального круга во время финишной обработки труднообрабатываемых материалов методом комбинированного шлифования. Основное внимание уделено процессу эрозионного разрушения связки круга, который играет ключевую роль в поддержании работоспособности инструмента. Рассматривается влияние различных факторов на образование эрозионных лунок и их распределение на поверхности связки. На основе анализа предложенных зависимостей разработана модель, описывающая изменение состояния шлифовального круга за период его стойкости. Модель позволяет учитывать такие параметры, как количество эрозионных разрядов, скорость их распространения, глубину и ширину лунок, а также плотность распределения этих лунок на поверхности связки. В заключение подчеркивается важность комплексного подхода к моделированию процесса обработки для оптимизации условий эксплуатации инструмента и повышения качества финишной обработки.

## MAINTAINING THE WORKING CAPACITY OF THE GRINDING WHEEL DUE TO THE DIRECTIONAL ELECTRO-EROSIVE DESTRUCTION OF THE METAL BUNDLE

**Bogutsky V.B., Tarakhovskiy A.Yu.**

*Sevastopol State University, Sevastopol;*

*Crimean Engineering and Pedagogical University the name of Fevzi Yakubov, Simferopol*

**Keywords:** grinding, grinding wheel, process stabilization, metal binding, electroerosion destruction, mathematical model.

**Abstract.** The article presents the development of a mathematical model that takes into account changes in the state of the grinding wheel during finish machining of difficult-to-machine materials using combined grinding methods. The focus is on the process of erosive destruction of the bond in the wheel, which plays a crucial role in maintaining tool performance. The influence of various factors on the formation and distribution of erosion pits on the surface of the bond is examined. Based on the analysis of proposed dependencies, a model describing the change in the condition of the grinding wheel over its service life has been developed. This model allows for consideration of parameters such as the number of erosion discharges, their propagation speed, depth and width of pits, as well as the density of these pits on the bond's surface. In conclusion, the importance of a comprehensive approach to modeling the machining process for optimizing tool operating conditions and improving the quality of finish machining is emphasized.

**Введение.** При финишной обработке труднообрабатываемых материалов в большинстве случаев рекомендуется использовать процессы комбинированного шлифования, при которых съем материала, осуществляется в результате совмещения процессов резания и эрозионного удаления материала [1-3 и др.]. Наиболее слабым элементом этого процесса является шлифовальный круг, так как свойства его режущей поверхности в результате износа абразивных зерен меняются в процессе выполнения обработки [1, 4, 5 и др.]. Для обеспечения стабилизации процесса финишной обработки деталей необходимо в процессе работы обеспечивать постоянную работоспособность поверхности инструмента что, в свою очередь, требует разработки математических моделей, позволяющих автоматизировать процесс обработки и оптимизировать его по заданным критериям.

На основании вышеизложенного целью статьи является разработка математических моделей учитывающих изменение состояния шлифовального круга за период его стойкости, позволяющих поддерживать его свойства за счет направленного электро-эрозионного разрушения связки.

**Основная часть.** Одним из распространенных методов финишной обработки является алмазно-искровое шлифование, при котором в процессе работы работоспособное состояние шлифовального круга поддерживается за счет целенаправленного разрушения его связки [1, 2, 6].

Как показано многими авторами [1, 3, 7 и др.] электро-эрозионное удаление материала в процессе работы является случайным процессом, который можно охарактеризовать полнотой съема материала связки инструмента. Вероятность эрозионного разрушения связки  $P_{edb}$  определим, как вероятность того, что случайная величина  $l_{ed}$  окажется меньше половины ширины двух соседних лунок  $b_{cav}(q)$  глубиной  $h_{cav}$  на уровне  $q$  (рис. 1):

$$P_{edb}(q) = P(0 < l_{ed} \leq b_{cav}(q)) = \int_0^{b_{cav}(q)} f(l_{ed}) dl_{ed}. \quad (1)$$

где  $P_{edb}$  – вероятность эрозионного разрушения связки;  $l_{ed}$  – расстояние между двумя соседними лунками;  $b_{cav}(q)$  – ширина лунки на уровне  $q$ ;  $h_{cav}$  – глубина лунки;  $q$  – рассматриваемый уровень.

Определим плотность распределения  $f(l_{ed})$ , характеризуя появление событий  $l_{ed}$  как простейший поток с показательным законом распределения плотности вероятности [8-10]

$$f(l_{ed}) = \lambda e^{-\lambda l_{ed}}.$$

где  $\lambda$  – параметр (плотность) распределения.

Тогда выражение для расчета вероятности удаления связки запишется в виде:

$$P_{edb}(q) = \int_0^{b_{cav}(q)} \lambda e^{-\lambda l_{ed}} dl_{ed} = 1 - e^{-\lambda b_{cav}(q)} = 1 - e^{-\Delta a_b(q, n_k)},$$

где  $\lambda$  – среднее количество лунок на единицу поверхности связки;  $n_k$  – количество проходов сечения круга через зону контакта;  $\Delta a_b(q, n_k) = \Delta \lambda \cdot b_{cav}(q)$ ;  $\Delta \lambda$  – изменение плотности распределения.

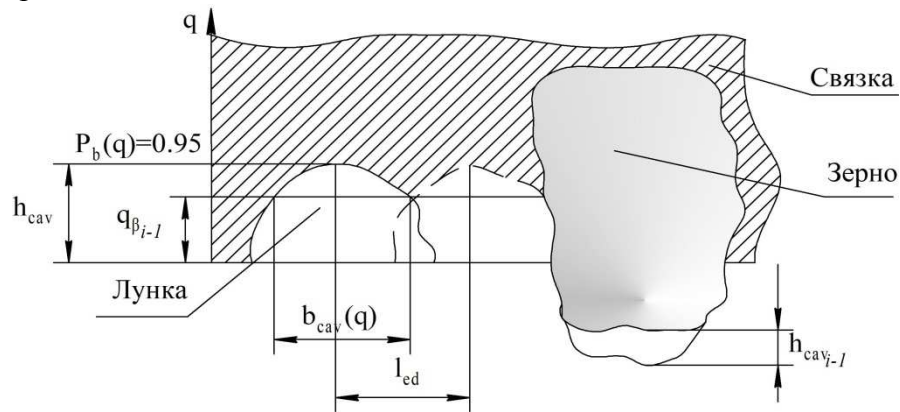


Рис. 1. Определение вероятности удаления связки

Рассмотрим зону контакта круга с заготовкой. За время обработки  $t_{pr}$  сечение круга проходит через зону контакта  $n_k$  раз, т.е.

$$n_k = \frac{V_k t_{pr}}{l_{cr}}.$$

где  $l_{cr} = 2\pi R_k$  – длина окружности по периферии абразивного круга;  $R_k$  – радиус шлифовального круга;  $V_k$  – скорость круга;  $t_{pr}$  – время обработки.

Возникший искровой разряд за время своего существования  $\tau_d$  перемещается по поверхности круга со скоростью  $V_{sk}$  и успевает пройти расстояние  $V_{sk} \cdot \tau_d$ . Все разряды, возникшие на дуге  $z = V_{sk} \cdot \tau_d$  пройдут через сечение, расположенное в конце этого сектора.

Это значит, что на каждое сечение круга за один оборот будет воздействовать такое же количество эрозионных разрядов.

Тогда приращение количества разрядов, возникших на дуге круга длиной  $\Delta z = V_{sk} \cdot \tau_d$ , запишется как

$$\Delta n_d = k_{ed} k_c n_{ed} f_{ed}(u) \Delta z \Delta u.$$

где  $k_{ed}$  – коэффициент эрозионного разрушения;  $k_c$  – коэффициент стружкообразования;  $n_{ed}$  – количество зерен абразива в единице объема рабочего слоя инструмента;  $u$  – расстояние от условной наружной поверхности инструмента до вершины абразивного зерна;  $f_{ed}(u)$  – функция распределения количества рабочих зерен инструмента по координате  $u$ .

Из общего объема инструмента проводником является металлическая связка, поэтому разряды, возникающие при обработке, будут разрушать исключительно ее поверхность. Алмазные зерна, занимая некоторую площадь на поверхности инструмента, повышают плотность распределения эрозионных лунок на поверхности связки (рис. 2).

Таким образом, определим приращение среднего количества лунок на поверхности связки как

$$\Delta \lambda_{cav.b} = \frac{S_{ta}}{S_b} \Delta n_d = \mu_b \Delta n_d.$$

где;  $S_{ta}$ ,  $S_b$  – общая и занимаемая связкой площадь поверхности инструмента;  $\mu_b$  – коэффициент, учитывающий то, что эрозия действует только на поверхность связки.

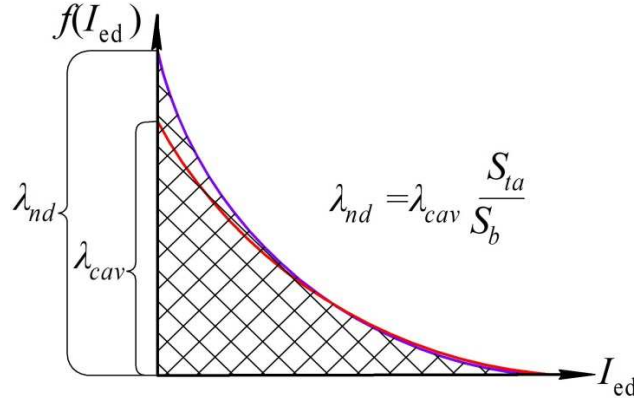


Рис. 2. Плотность распределения расстояний между лунками на поверхности связки

Для алмазного круга величина  $\mu_b$  может быть определена как

$$\mu_b = \frac{1}{1 - 0,25 \cdot V_b},$$

где  $V_b$  – объемное содержание связки в инструменте.

Переходя от приращений к непрерывной форме записи, пределы интегрирования определим, исходя из того, что стружки могут образовывать только те зерна, вершины которых расположены в слое круга  $u = t_f$  ( $t_f$  – фактическая глубина резания абразивного зерна), а все разряды, возникшие на дуге через сечение, расположенное в конце этого сектора. Тогда  $a_b(q, n_k)$  определится общей шириной лунок на уровне  $q$  (рис. 1) после  $n_k$  оборотов

$$a_b(q, n_k) = \sum_{i=0}^{n_k} \int_0^{t_f} \int_0^{V_{sk} \cdot \tau_d} k_{ed} k_c n_{ed} \mu_b C_f u^{\chi-1} b_{ed} du dz,$$

$$b_{ed}(q) = 0 \quad \text{при} \quad q < q_\beta,$$

$$b_{ed}(q) = R_1 \sqrt{h_{cav} - q + q_\beta} \quad \text{при} \quad q_\beta \leq q \leq q_\beta + h_{cav},$$

$$b_{ed}(q) = 0 \quad \text{при} \quad q > q_\beta + h_{cav},$$

где  $R_1$  – коэффициент пропорциональности ширины лунки [9, 10];  $h_{cav}$  – глубина лунки;  $q_\beta$  – уровень связки, на котором рассчитывается вероятность удаления связки  $P_b(q) \geq \beta_m$  (доверительная вероятность удаления материала).

Глубину лунки, сформированную разрядом, определим по методике, рассмотренной в [10]. Механизмы формирования лунки на заготовке и на связке круга одинаковы. Различия вытекают из принятой полярности обработки и схем взаимного перемещения инструмента и заготовки.

При обратной полярности (круг – анод) глубина лунки, образовавшейся на поверхности инструмента вследствие действия разряда определяется как

$$h_{cav.b} = \frac{\beta_b \cdot z_n \pi \cdot U^2}{\rho_b [c_{T.b} (\Theta_{hm.b} - \Theta_{0.b}) + L_{hm.b} + 0,5V_p^2] \cdot (\pi k_r^2 + 2V_{sk} \cdot r_z) \cdot (x_k - t_f + S_{wp})}, \quad (3)$$

С учетом (2) и (3) запишем:

$$a_b(q, n_k) = \sum_{i=0}^{n_k} k_{ed} k_c n_{ed} \mu_b C_f \int_0^{t_f} u^{\chi-1} du \cdot R_1 \int_0^{V_{ek} \tau_p} \left( \frac{\beta_b \cdot z_n \pi \cdot U^2}{M_1 (\pi k_r^2 + 2V_{sk} \cdot r_z) \cdot (x_k - t_f + S_{wp})} - (q - q_s) \right)^{0,5} dz, \quad (4)$$

где  $M_1 = \rho_b [c_{T.b} (\Theta_{hm.b} - \Theta_{0.b}) + L_{hm.b} + 0,5V_p^2]$ ;  $U$  – подаваемое напряжение, В;  $c_{T.b}$  – удельная теплопроводность связки, Дж/кг·К;  $L_{hm.b}$  – теплота плавления связки, К;  $\Theta_{0.b}$ ,  $\Theta_{hm.b}$  – начальная температура и температура плавления связки, К;  $\rho_b$  – плотность связки, кг/мм<sup>3</sup>;  $r_z$  – средний радиус зерен, мм;  $\beta_b$  – доля энергии разряда, поступающей на электрод,  $\beta_b=0,3$ ;  $z_n$  – характеристика электропроводности связки круга, 1/(Ом·мм);  $S_{wp}$  – глубина удаленного слоя заготовки, мм.

Решение (4) позволяет получить удобное для проведения расчетов выражение

$$a_b(q, n_k) = \sum_{i=0}^{n_k} \frac{k_{ed} k_c n_{ed} \mu_b C_f R_1 V_{sk} \tau_d t_f}{\chi} \cdot \sqrt{\frac{\beta_b \cdot z_n \cdot k_r^2 \cdot \pi \cdot U^2}{M_1 (\pi k_r^2 + 2V_{sk} \cdot r_z) \cdot (x_k - t_f + S_{wp})} - (q - q_s)}.$$

Используя это уравнение, можно вычислить величину слоя связки круга, удаленную эрозионными разрядами. В установившемся режиме на проходе от оборота к обороту будет изменяться лишь  $q_b$ . Остальные параметры будут оставаться без изменений.

*Пример.* Рассчитать вероятность эрозионного удаления материала связки на уровне  $q = 0,002$  мм от поверхности на 200-й секунде работы алмазного круга 12D9 300×20×75 АС6 250/160КМ1-01 в 0,5% водном растворе CaCO<sub>3</sub> при плоском попутном шлифовании периферией круга заготовки из твердого сплава ВК6 на обратной полярности при следующих режимах:  $V_k = 35$  м/с;  $V_u = 0,262$  м/с;  $U = 30$  В; частота генератора  $f = 22$  кГц.

Начальные условия:  $t_f = 0,01155$  мм;  $\rho_b = 8,4773 \cdot 10^{-6}$  кг/мм<sup>3</sup>;  $x_z = 0,125$  мм;  $S_{wp} = 0,01$  мм;  $D_b = 299$  мм;  $c_{T.b} = 386$  Дж/кг·К;  $z_n = 4,42 \cdot 1/(\text{Ом} \cdot \text{мм})$ ;  $\Theta_{0.b} = 773$  К;  $r_z = 0,5 \cdot 10^{-3}$  мм;  $\Theta_{hm} = 900$  К;  $k_r = 0,5$  мм/с<sup>0,5</sup>;  $L_{hm.b} = 386000$  Дж/кг;  $V_{skz} = 1000$  мм/с;  $V_{sk} = 2000$  мм/с.

Рассчитаем количество оборотов круга за время работы:

$$n_k = \frac{V_k t_{pr}}{\pi D_k} = \frac{35000 \cdot 200}{\pi \cdot 300} = 7427 \text{ об.}$$

Определим максимально возможное время разряда:

$$\tau_{\max} = \frac{\sqrt{t_f D_k}}{V_k \pm V_u - V_{sk} - V_{skz}} = \frac{\sqrt{0,01155 \cdot 300}}{35000 + 262 - 2000 - 1000} = 5,66 \cdot 10^{-5} \text{ с.}$$

Минимальное время импульса генератора  $\tau_m = 1/f = 4,55 \cdot 10^{-5}$ . В начальный момент времени круг практически не изнашивается, поэтому при расчете полагаем  $q = 0$ ,  $h_z = 0$ . Коэффициент  $\mu_b$  при 100% концентрации алмазов в инструменте определим как  $\mu_b = 1/(1 - 0,25 \cdot 1) = 1,33$ .

Коэффициент  $\beta_b$ , определяется экспериментально. При обратной полярности плотность потока к поверхности связки формируется за счет электронного тока, поэтому  $\beta_b$  можно считать постоянным и равным 0,3 [1, 10]. Тогда

$$M_1 = 8,4 \cdot 10^{-6} [386 \cdot (900 - 773) + 386000 + 0,5 \cdot 200000^2] = 168003,6541,$$

$$a_b = \frac{7427 \cdot 0,7 \cdot 0,9 \cdot 5,2 \cdot 0,4 \cdot 5 \cdot 0,2 \cdot 1,4 \cdot 4,55 \cdot 10^{-2} \cdot 1,33}{1,5} \cdot 0,01155^{\frac{2}{3}} \times \\ \times \sqrt{\frac{0,3 \cdot 4,42 \cdot 0,5^2 \cdot 3,14 \cdot 30^2}{68003,65 \cdot (3,14 \cdot 0,5^2 + 2 \cdot 2000 \cdot 0,5) \cdot (0,125 - 0,01155 + 0,01)}} - 0,002 = 0,1541.$$

Вероятность удаления связки на уровне  $q = 0,002$  мм от поверхности определяется по формуле (1):

$$P_{edb}(0,002) = 1 - \exp[-0,1541] = 0,143.$$

Последовательно рассчитывая вероятность по всем уровням в различные моменты времени, можно следить за износом круга. Выражение для определения слоя удаленной связки запишем при помощи единичной функции

$$q_\beta(n_k) = \int_0^q 1(P(q, n_k) - \beta_m) dq.$$

где  $1(P(q, n_k) - \beta_m)$  – единичная функция, которая при достижении  $P(q)$  величины  $\beta_m$  принимает значение, равное единице;  $P(q)$  – суммарная вероятность удаления материала связки на уровне  $q$ ;  $q_\beta$  – наиболее удаленный от поверхности связки уровень  $q$ , на котором  $P(q) > \beta_m$ .

**Заключение.** Полученная модель позволяет имитировать состояние инструмента в любой момент времени, последовательно прогнозируя все предыдущие стадии развития элементов операции. Комплексный подход при моделировании дает возможность оптимизировать переход системы от начального состояния к конечному.

#### Список литературы

1. Brian Rowe W.. Principles of modern grinding technology. 2nd Edition. William Andrew Publ., 2013. – 480 p.
2. Янюшкин А.С., Попов В.Ю., Васильев Е.В., Попов А.Ю. Комбинированная электроалмазная обработка инструментальных сталей: монография. – Братск: БрГУ, 2009. – 228 с.
3. Bratan S.M., Bogutsky V.B., Roshchupkin S.I. Development of mathematical model of material removal calculation for combined grinding process // Proceedings of the 4th International conference on industrial engineering ICIE 2018. Lecture notes in mechanical engineering. 2019, pp. 1759-1769.
4. Korolev A.V., Vasin A.N., Nazar'eva V.A., Reshetnikova O.P. Cutting geometry of abrasive grains // Russian Engineering Research. 2014, vol. 34, no. 10, pp. 655-659.
5. Богущий В.Б., Шрон Л.Б. Изменение характеристик рабочей поверхности шлифовального круга за период его стойкости // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. – 2019. – Т. 19, № 2. – С. 66-74.
6. Салов П.М., Денисенко А.Ф., Салова Д.П., Сайкин С.С., Мулюхин Н.В. Совершенствование технологий шлифования за счет управления формой кругов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2018. – Т. 20, № 4(2). – С. 298-303.
7. Ящерицын П.И., Дорофеев В.Д., Пахалин Ю.А. Электроэрозионная правка алмазно-абразивных инструментов. – Минск: Наука и техника, 1981. – 232 с.
8. Stępień Piotr. A probabilistic model of the grinding process // Applied Mathematical Modelling. 2009, vol. 33, iss. 10, pp. 3863-3884.
9. Братан С.М., Богущий В.Б., Новоселов Ю.К., Рошчупкин С.И. Моделирование процесса стохастического взаимодействия инструмента и заготовки на операциях шлифования // Научные технологии в машиностроении. – 2017. – № 5(71). – С. 9-18.
10. Братан С.М. Технологические основы обеспечения качества и повышения стабильности высокопроизводительного чистового и тонкого шлифования: Дисс. ... докт. техн. наук. – Одесса: Одесский национальный политехнический университет, 2006. – 321с.

#### References

1. Brian Rowe W.. Principles of modern grinding technology. 2nd Edition. William Andrew Publ., 2013. – 480 p.
2. Yanushkin A.S., Popov V.Yu., Vasiliev E.V., Popov A.Yu. Combined electro-diamond processing of tool steels: monograph. – Bratsk: BrSU, 2009. – 228 p.
3. Bratan S.M., Bogutsky V.B., Roshchupkin S.I. Development of mathematical model of material removal calculation for combined grinding process // Proceedings of the 4th International conference on industrial engineering ICIE 2018. Lecture notes in mechanical engineering. 2019, pp. 1759-1769.
4. Korolev A.V., Vasin A.N., Nazar'eva V.A., Reshetnikova O.P. Cutting geometry of abrasive grains // Russian Engineering Research. 2014, vol. 34, no. 10, pp. 655-659.

5. Bogutsky V.B., Shron L.B. Change in the characteristics of the working surface of the grinding wheel over the period of its durability // Bulletin of the South Ural State University. Series: Mechanical engineering. 2019, vol. 19, no. 2, pp. 66-74.
6. Salov P.M., Denisenko A.F., Salova D.P., Saikin S.S., Melyukhin N.V. Improvement of grinding technologies by controlling the shape of circles // Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2018, vol. 20, no. 4(2), pp. 298-303.
7. Yashchericyn P.I., Dorofeev V.D., Pakhalin Yu.A. Electroerosion straightening of diamond-abrasive tools. – Minsk: Science and Technology, 1981. – 232 p.
8. Stępień Piotr. A probabilistic model of the grinding process // Applied Mathematical Modelling. 2009, vol. 33, iss. 10, pp. 3863-3884.
9. Bratan S.M., Bogutsky V.B., Novoselov Yu.K., Roshchupkin S.I. Modeling of the stochastic interaction of a tool and a workpiece during grinding operations // High-tech technologies in mechanical engineering. 2017, no. 5(71), pp. 9-18.
10. Bratan S. M. Technological foundations of quality assurance and stability improvement of high-performance finishing and fine grinding: Diss. ... doct. of tech. sc. – Odessa: Odessa National Polytechnic University, 2006. – 321 p.

*Сведения об авторах:*

**Богущий Владимир Борисович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизация и технология машиностроения» «СевГУ», старший научный сотрудник научно-производственного центра инжиниринговых технологий КИПУ им. Февзи Якубова

**Тараховский Алексей Юрьевич** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Цифровое проектирование» СевГУ, старший научный сотрудник научно-производственного центра инжиниринговых технологий КИПУ им. Февзи Якубова

AYTarakhovskiy@sevsu.ru

*Information about authors:*

**Bogutsky Vladimir Borisovich** – candidate of technical sciences, associate professor of the Department of «Automation and mechanical engineering technology» of SevSU, senior researcher of the scientific and production center of engineering technologies of CEPU n.a. Fevzi Yakubov

**Tarakhovsky Aleksey Yurievich** – candidate of technical sciences, associate professor, head of the Department of «Digital design» of SevSU, senior researcher of the Scientific and production center of engineering technologies of CEPU n.a. Fevzi Yakubov

Получена 06.02.2025