

DOI 10.32820/2079-1747-2019-23-41-48

УДК 621.923

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА ПРИ
ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОМ АЛМАЗНОМ ШЛИФОВАНИИ****©Стрельчук Р. М.***Украинская инженерно-педагогическая академия***Информация об авторе:**

Стрельчук Роман Михайлович: ORCID: 0000-0002-7221-031X; r.m.strelchuk@gmail.com; кандидат технических наук; доцент кафедры информационных компьютерных технологий и математики; Украинская инженерно-педагогическая академия, ул. Университетская 16, г. Харьков, 61003, Украина.

В работе показано, что увеличение скорости продольной подачи, также как и глубины шлифования приводит к росту плотности теплового потока. Это объясняется повышением уровня термодинамических нагрузок вследствие увеличения толщины слоя срезаемого одним зерном. Широкое распространение наряду с многопроходным (маятниковым) шлифованием получило однопроходное (глубинное) шлифование, когда весь припуск на обработку снимают за один рабочий ход. При этом происходит увеличение длины контакта круга с изделием, и длительность теплового воздействия оказывается на один-два порядка больше, чем при маятниковом шлифовании. Особенностью шлифования является малое время воздействия теплового источника при наличии больших удельных нагрузок в зоне контакта круга с обрабатываемой поверхностью. За время действия алмазного круга тончайшие слои материала (до 1 мкм) нагреваются до температур 600...1000°C. Вслед за нагревом происходит быстрый отвод тепла в глубинные слои материала со скоростями охлаждения поверхностных слоев примерно такими же, как и при нагреве. Такая кинетика тепловых процессов шлифования способствует формированию в поверхностных слоях деталей структурных изменений, внешне характеризующихся прижогами. Кроме прижогов на поверхностях деталей после шлифования часто наблюдаются трещины в результате действия мгновенных и суммарных остаточных внутренних напряжений, возникающих вследствие неоднородной пластической деформации в разных зонах поверхностного слоя. Как показали исследования, уменьшение скорости продольной подачи позволяет значительно снизить теплонапряженность процесса. Таким образом, анализ показывает, что наибольшее значение плотности теплового потока, также как и при маятниковом шлифовании, наблюдаются при $\gamma = 0^\circ$. В этом случае глубина шлифования будет максимальной, следовательно, сила резания и тепловой поток наибольшими. При глубинном шлифовании увеличение скорости изделия приводит к росту плотности теплового потока. Это объясняется увеличением толщины срезаемого слоя одним алмазным зерном. Анализ показывает, что при глубинном шлифовании плотность теплового потока достигает больших значений, чем при маятниковом. Однако, соответствующей коррекци-

ровкой технологических режимов можно добиться уменьшения теплонапряженности процесса.

Ключевые слова: электроэрозионное алмазное шлифование, плотность теплового потока, длина дуги контакта.

Стрельчук Р.М. «Розподіл теплового потоку при електроерозійному алмазному шліфуванні»

В роботі показано, що збільшення швидкості поздовжньої подачі, також як і глибини шліфування призводить до зростання щільності теплового потоку. Це пояснюється підвищенням рівня термодинамічних навантажень внаслідок збільшення товщини шару, що зрізається одним зерном. Широке поширення поряд з багатопрхідним (маятниковим) шліфуванням отримало однопрхідне (глибинне) шліфування, коли весь припуск на обробку знімають за один робочий хід. При цьому відбувається збільшення довжини контакту круга з виробом, і тривалість теплового впливу виявляється на один-два порядки більше, ніж при маятниковому шліфуванні. Особливістю шліфування є малий час впливу теплового джерела при наявності великих питомих навантажень в зоні контакту круга з оброблюваною поверхнею. За час дії алмазного круга найтонші шари матеріалу (до 1 мкм) нагріваються до температур 600 ... 1000°C. Слідом за нагріванням відбувається швидке відведення тепла в глибинні шари матеріалу зі швидкостями охолодження поверхневих шарів приблизно такими ж, як і при нагріванні. Така динаміка теплових процесів шліфування сприяє формуванню в поверхневих шарах деталей структурних змін, зовні характеризуються як прижоги. Крім прижогів на поверхнях деталей після шліфування часто спостерігаються тріщини в результаті дії миттєвих і сумарних залишкових внутрішніх напружень, що виникають внаслідок неоднорідної пластичної деформації в різних зонах поверхневого шару. Як показали дослідження, зменшення швидкості поздовжньої подачі дозволяє значно знизити теплонапружність процесу. Таким чином, аналіз показує, що найбільше значення щільності теплового потоку, також як і при маятниковому шліфуванні, спостерігаються при $\gamma=0^\circ$. У цьому випадку глибина шліфування буде максимальною, отже, сила різання і тепловий потік найбільшими. При глибинному шліфуванні збільшення швидкості виробу призводить до зростання щільності теплового потоку. Це пояснюється збільшенням товщини зрізаного шару одним алмазним зерном. Аналіз показує, що при глибинному шліфуванні щільність теплового потоку досягає великих значень, ніж при маятниковому. Однак, відповідним коригуванням технологічних режимів можна домогтися зменшення теплонапружності процесу.

Ключові слова: електроерозійне алмазне шліфування, щільність теплового потоку, довжина дуги контакту.

Strelchuk R. «Distribution of heat flow during electrical discharges diamond grinding».

The paper shows that an increase in the speed of the longitudinal feed, as well as the depth of grinding, leads to an increase in the heat flux density. This is due to the increased level of thermodynamic loads due to an increase in the thickness of the layer being cut by a single grain. Along with multipass (pendulum) grinding, one-pass (deep) grinding became widespread, when the entire allowance for processing is removed in one working stroke. When this occurs, the increase in the length of the contact of the circle with the product, and the duration of thermal exposure is one to two orders of magnitude longer than with pendulum grinding. The peculiarity of grinding is the short time of exposure of the heat source in the presence of large specific loads in the zone of contact of the circle with the surface being treated. During the action of the diamond wheel, the thinnest layers of material (up to 1 micron) are heated to temperatures of 600 ... 1000 ° C. Following heating, there is a rapid heat removal to the deep layers of the material with the rates of cooling of the surface layers approximately the same as during heating. Such kinetics of thermal grinding processes contributes to the formation of structural changes in the surface layers of parts that are externally characterized by burns. In addition to prizhog, cracks are often observed on the surfaces of parts after grinding as a result of the action of instantaneous and total residual internal stresses resulting from non-uniform plastic deformation in different zones of the surface layer. Studies have shown that reducing the speed of the longitudinal feed can significantly reduce the thermal stress of the process. Thus, the analysis shows that the highest value of the heat flux density, as well as during pendulum grinding, is observed at $\gamma = 0^\circ$. In this case, the depth of grinding will be maximum, therefore, the cutting force and heat flux are the greatest. During deep grinding, an increase in the speed of the product leads to an increase in the density of the heat flux. This is due to an increase in the thickness of the cut layer by a single diamond grain. The analysis shows that with deep grinding the heat flux density reaches higher values than with the pendulum. However, a corresponding adjustment of technological regimes can reduce the thermal stress of the process.

Key words: electrical discharges diamond grinding, heat flow density, contact arc length.

Введение

Основным параметром, характеризующим источник тепла, возникающий при алмазном шлифовании, является плотность теплового потока, которая представляет собой количество тепла, переходящее в единицу времени и отнесенное к единице площади изотермической поверхности. в общем случае плотность теплового потока при шлифовании может быть рассчитана по формуле [1, 2]:

$$q = \frac{P_z V_{kp}}{F}, \quad (1)$$

где P_z – тангенциальная составляющая силы резания, н, $V_{кр}$ – скорость шлифовального круга, м/с, F – площадь контакта шлифовального круга с изделием, мм².

Методология исследования

В отличие от обработки кругом прямого профиля, когда площадь контакта круга с изделием представляет собой прямоугольник, при электроэрозионном профильном шлифовании она имеет сложную форму. для определения локальной плотности теплового потока на отдельном участке выделим из шлифовального круга элемент шириной db и рассмотрим его взаимодействие с изделием. При плоском шлифовании длина дуги контакта определяется следующим образом [3, 4]:

$$L_{ki} = \sqrt{D_i t}, \quad (2)$$

где D_i – диаметр круга в рассматриваемой точке, мм, t – глубина шлифования, мм.

Результаты исследований

Расчеты показывают, что при изменении глубины профиля изменение диаметра круга составляет около 5%. При этом изменение длины дуги контакта будет не более 2,5%. Отсюда можно сделать вывод, что перепады профиля не оказывают существенного влияния на изменение величины L_{ki} . Исходя из этого вывода, диаметр шлифовального круга можно принять постоянным.

При электроэрозионном профильном шлифовании образующая линия профиля круга имеет сложную форму, вследствие чего условия резания на отдельных его участках, а также площадь контакта круга с изделием будут существенно различаться. Для произвольной точки профиля фактическая глубина шлифования t_{γ_i} определится как [4]:

$$t_{\gamma_i} = t \cos \gamma_i, \quad (3)$$

где γ_i – угол наклона местной нормали.

Учитывая (3), длину дуги контакта найдем следующим образом:

$$L_{ki} = \sqrt{D_i t_{\gamma_i}}. \quad (4)$$

Площадь контакта dF алмазного круга с обрабатываемой поверхностью выразится как:

$$dF = dB L_k, \quad (5)$$

С учетом (4), получим:

$$dF_i = dB \sqrt{D_i t_{\gamma_i}}, \quad (6)$$

Зависимость, иллюстрирующая изменение длины дуги контакта L_k и площади контакта F по профилю показана на рис. 1-2.

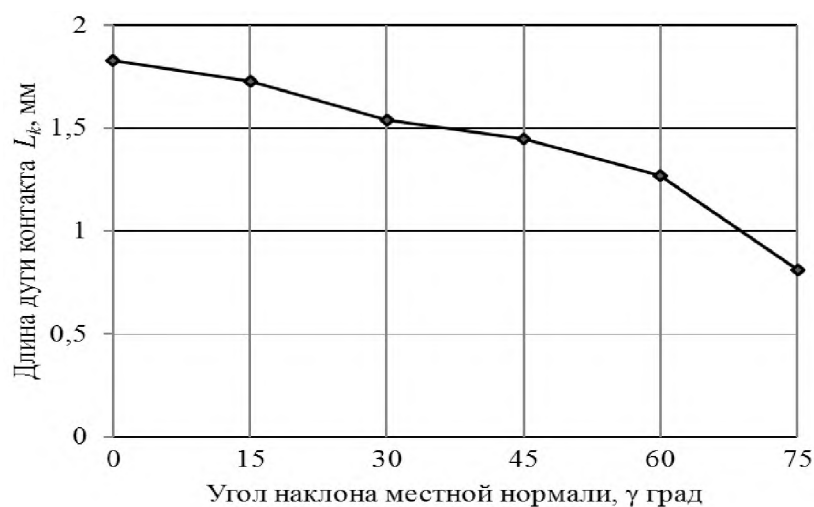


Рис. 1 Влияние угла наклона местной нормали γ на длины дуги контакта L_k

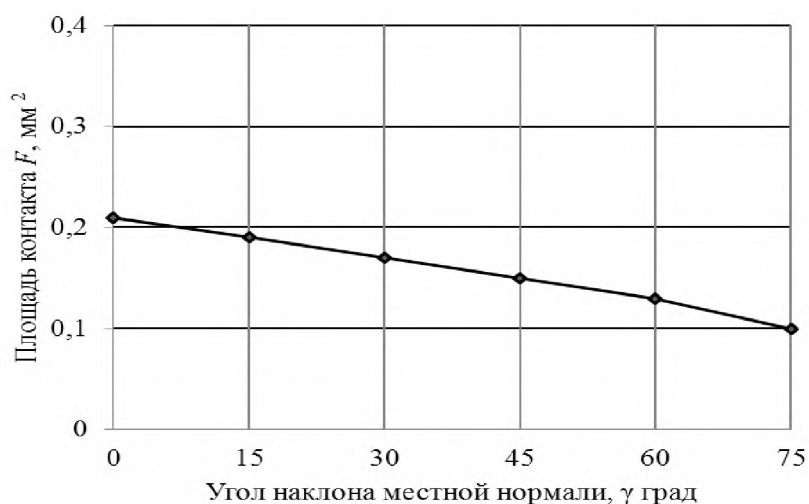


Рис. 2 Влияние угла наклона местной нормали γ на площадь контакта F

Из графиков видно, что увеличение угла γ приводит к уменьшению длины кривой контакта, и как следствие снижение величины площади контакта круга с деталью.

Тангенциальная составляющая силы резания P_z , возникающая при шлифовании, в общем случае определится как [5, 6, 7]:

$$P_z = C_{P_z} \cdot t^{x_{P_z}} \cdot V_u^{y_{P_z}} \cdot V_{кр}^{z_{P_z}} \cdot dB, \quad (7)$$

где C_{P_z} – коэффициент, учитывающий влияние обрабатываемого материала и условия обработки; V_u – скорость продольной подачи изделия; $V_{кр}$ – скорость круга; B – ширина круга;

x_{P_z} , y_{P_z} , z_{P_z} – показатели степени, характеризующие степень влияния режимов шлифования.

Для элементарного участка dB с учетом (3) величина P_z находится следующим образом:

$$dP_z = C_{P_z} \cdot (t \cos \gamma_i)^{x_{P_z}} \cdot V_u^{y_{P_z}} \cdot V_{kp}^{z_{P_z}} \cdot dB. \quad (8)$$

Скорость резания V_{kp} на элементарном участке будет равна:

$$V_{kp} = \frac{\pi D n}{1000 \cdot 60}, \quad (9)$$

где n – частота вращения шлифовального круга.

Тогда текущая величина плотности теплового потока выразится как:

$$q_i = \frac{dP_z \cdot V_{kp}}{dF_i}, \quad (10)$$

После подстановки (6), (8), (9) в (10) и преобразований получим формулу для расчета плотности теплового потока на элементарном участке профиля:

$$q_i = C_1 \cdot (\cos \gamma_i)^{x_{P_z} - 0.5} \cdot D^{0.5 - z_{P_z}} \cdot 10^6, \quad (11)$$

где $C_1 = C_{P_z} \cdot t^{x_{P_z} - 0.5} \cdot V_u^{y_{P_z}} \cdot n^{1 - z_{P_z}} \left(\frac{\pi}{60 \cdot 10^3} \right)^{1 - z_{P_z}}$

На рис. 3 показано изменение плотности теплового потока q по профилю изделия. Из графика видно, что своего максимального значения тепловой поток достигает на горизонтальных участках профиля при $\gamma = 0^\circ$. С увеличением угла наклона местной нормали тангенциальная составляющая силы резания уменьшается, вследствие чего снижается и плотность теплового потока. Анализ показывает, что увеличение скорости продольной подачи, также как и глубины шлифования приводит к росту плотности теплового потока. Это объясняется повышением уровня термодинамических нагрузок вследствие увеличения толщины слоя срезаемого одним зерном.

Широкое распространение наряду с многопроходным (маятниковым) шлифованием получило однопроходное (глубинное), когда весь припуск на обработку снимают за один рабочий ход. При этом происходит увеличение длины контакта круга с изделием, и длительность теплового воздействия оказывается на один-два порядка больше, чем при маятниковом шлифовании. Как показали исследования, уменьшение скорости продольной подачи позволяет значительно снизить теплонапряженность процесса. На рис. 4 показаны зависимости распределения плотности теплового потока при глубинном шлифовании.

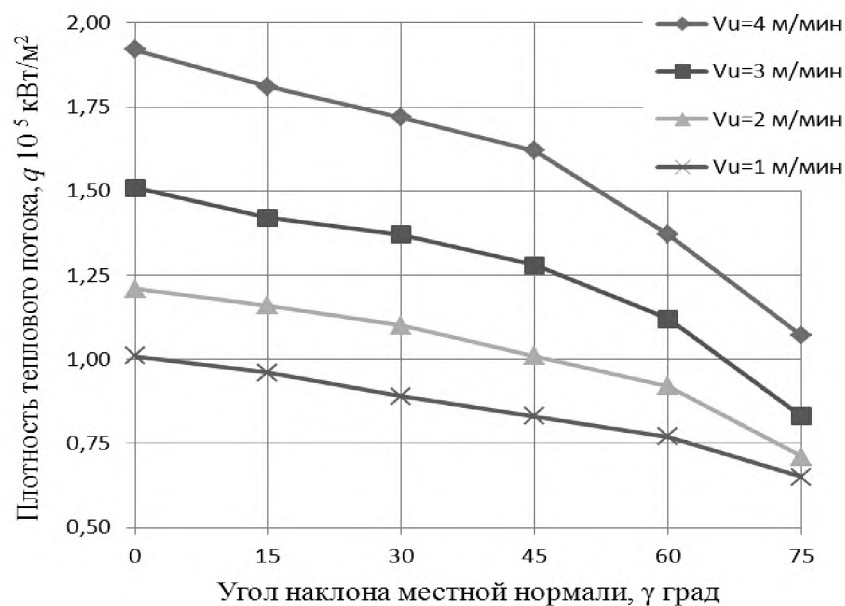


Рис. 3 Изменение плотности теплового потока от угла наклона местной нормали при маятниковом шлифовании

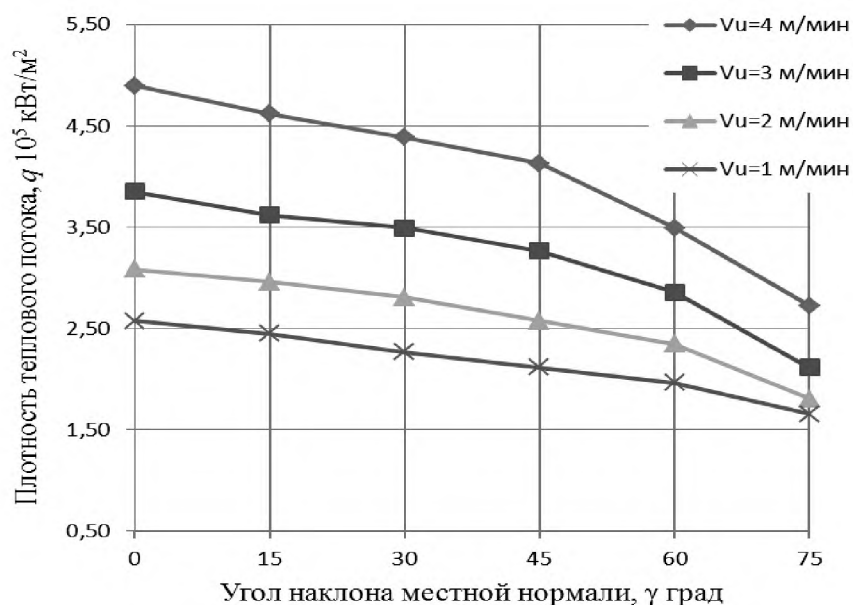


Рис. 4 Изменение плотности теплового потока от угла наклона местной нормали при глубинном шлифовании

Выводы

Таким образом, анализ показывает, что наибольшие значения плотности теплового потока, также как и при маятниковом шлифовании, наблюдаются при $\gamma = 0^\circ$. В этом случае глубина шлифования будет максимальной, следовательно, сила резания и тепловой поток наибольшими. При глубинном шлифовании увеличение скорости изделия приводит к росту

плотности теплового потока. Это объясняется увеличением толщины срезаемого слоя одним алмазным зерном. Анализ показывает, что при глубинном шлифовании плотность теплового потока достигает больших значений, чем при маятниковом. Однако, соответствующей корректировкой технологических режимов можно добиться уменьшения теплонапряженности процесса.

Список використаної літератури:

1. Дорофеев В. Д. Основы профильной алмазно-абразивной обработки / В.Д. Дорофеев. – Саратов : Изд-во Саратов. гос. ун-та, 1983. – 186 с.
2. In process estimation of fracture surface morphology during wheel scribing of a glass sheet by high-speed photoelastic observation / R. Hasegawa, S. Matsusaka, H. Hidai [et al.] // *Precis Engineering*. – 2016. –N 48. – Pp. 164-171.
3. Семко М. Ф. Основы алмазного шлифования / М. Ф. Семко, А. И. Грабченко, А. Ф. Раб, М. Д. Узунян [и др.]. – Киев : Техніка, 1978. – 192 с.
4. Gutsalenko Yu. Exploitative destruction features for detonation ultra-dispersed diamonds of initial metallic protection for abrasive powder grains to diamond-spark grinding tools / Yu. Gutsalenko, C. Iancu, S. Bratan // *Fiability & Durability*. – 2015. – No. 1 (14). – Pp. 3-8.
5. Кобзарь Л. Е. Прогрессивное алмазно-искровое шлифование / Л. Е. Коб-зарь, В. А. Фадеев, Н. К. Беззубенко. – Харьков : ХГПУ – ХНПО «ФЭД», 1995. – 152 с.
6. Development of a scribing wheel for cutting ceramic substrates and its wheel scribing and breaking technology / N. Tomei, K. Murakami, T. Hashimoto [et al.] // *JSAT*. – 2015. – N 59. – Pp. 705-710.
7. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения : в 10 т. Т. 4 : Теория абразивной и алмазно-абразивной обработки материалов / под общ. ред. Ф. В. Новикова и А. В. Якимова. – Одесса : ОНПУ, 2002. – 802 с.

References

1. Dorofeev, VD 1983, *Osnovy profilnoj almazno-abrazivnoj obrabotki*, Izdatelstvo Saratovskogo gosudarstvennogo universiteta, Saratov.
2. Hasegawa, R, Matsusaka, S, Hidai, H, Chiba, A, Morita, N & Onuma, T 2016, 'In-process estimation of fracture surface morphology during wheel scribing of a glass sheet by high-speed photoelastic observation', *Precis Engineering*, no. 48, pp. 164-171.
3. Semko, MF, Grabchenko, AI, Rab, AF, Uzunjan, MD et al. 1978, *Osnovy almaznogo shlifovaniya*, Tehnika, Kiev.
4. Gutsalenko, Yu, Iancu, C & Bratan, S 2015, 'Exploitative destruction features for detonation ultra-dispersed dia-monds of initial metallic protection for abrasive powder grains to diamond-spark grinding tools', *Fiability & Durability*, no. 1 (14), pp. 3-8.
5. Kobzar, LE, Fadeev, VA & Bezzubenko, NK 1995, *Progressivnoe almazno-iskrovoe shlifovanie*, Harkovskij gosudarstvennyj pedagogicheskij universitet, HNPO FJeD, Harkov.
6. Tomei, N, Murakami, K, Hashimoto, T, Kitaichi, M, Hirano, S & Fukunishi, T 2015, 'Development of a scribing wheel for cutting ceramic substrates and its wheel scribing and breaking technology', *JSAT*, no. 59, pp. 705-710.
7. Novikov, FV & Jakimov, AV (eds.) 2002, *Fiziko-matematicheskaja teorija processov obrabotki materialov i tehnologii mashinostroenija*, vol. 4 *Teorija abrazivnoj i almazno-abrazivnoj obrabotki materialov*, Odesskij nacionalnyj politehnicheskij universitet, Odessa.

Стаття надійшла до редакції 12 квітня 2019 р.