

УДК 621.923

**Ф.В. НОВИКОВ**, докт. техн. наук, ХНЭУ, Харьков;

**И.А. РЯБЕНКОВ**, канд. техн. наук, ГП ХМЗ “ФЭД”, Харьков

## **ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРЕРЫВИСТОГО ШЛИФОВАНИЯ**

Аналитически описана удельная интенсивность шлифования и показано, что с уменьшением условного напряжения резания удельная интенсивность шлифования увеличивается, что способствует повышению эффективности шлифования. Установлено, что при прерывистом шлифовании условное напряжение резания меньше, а удельная интенсивность шлифования больше, чем при обычном шлифовании, вследствие увеличения отношения толщины среза к радиусу округления зерна. Это позволило обосновать технологические возможности прерывистого шлифования.

**Ключевые слова:** шлифование, процесс резания, прерывистый круг, режущее зерно, удельная интенсивность шлифования, толщина среза, условное напряжение резания, микрорезание

**Введение.** Повышение качества и производительности финишной абразивной обработки является важным условием изготовления современных деталей машин и систем. Работами профессора Якимова А.В. доказана эффективность использования технологии прерывистого шлифования для уменьшения силы и температуры резания и соответственно повышения качества и производительности обработки. Однако при этом в полной мере не раскрыта физическая сущность достигаемого эффекта обработки, особенно с точки зрения механики прерывистого шлифования. Поэтому в настоящей работе разработана математическая модель определения важнейшего параметра процесса шлифования – удельной интенсивности шлифования и на ее основе обоснованы технологические возможности прогрессивного метода прерывистого шлифования.

**Анализ последних достижений и литературы.** В работах [1,2] показано, что применение прерывистого шлифования закаленных сталей обеспечивает поддержание в процессе обработки высокой режущей способности шлифовального круга, о чем свидетельствуют экспериментальные данные одного из основных технологических параметров шлифования – удельной интенсивности шлифования, которая с течением времени обработки остается фактически постоянной, тогда как при обычном шлифовании она интенсивно уменьшается во времени, снижая эффективность обработки. Принято считать, что это обуслов-

лено динамическим характером взаимодействия рабочего выступа круга с обрабатываемым материалом, обеспечивающим режим самозатачивания круга. В работе [3] экспериментально установлено, что эффективность прерывистого шлифования связана с увеличением скорости съема металла при взаимодействии рабочего выступа круга с обрабатываемым материалом, увеличением толщин срезов зернами круга и уменьшением энергоемкости обработки. Поэтому важно теоретически оценить данные закономерности.

**Цель работы, постановка проблемы.** Целью работы является обоснование условий повышения эффективности процесса прерывистого шлифования на основе разработки математической модели определения удельной интенсивности шлифования на уровне микросрезов. Для этого необходимо выразить удельную интенсивность шлифования через отношение толщины среза отдельным зерном к радиусу округления режущего зерна, являющегося одним из основных физических показателей шлифования.

**Материалы исследований.** Удельная интенсивность шлифования  $Q_{уд} = Q / P_y$  [4] при обычном шлифовании с учетом аналитической зависимости для определения радиальной составляющей силы резания  $P_y = P_z / K_{ш} = \sigma \cdot Q / K_{ш} \cdot V_{кр}$  [5] описывается:

$$Q_{уд} = \frac{K_{ш} \cdot V_{кр}}{\sigma}, \quad (1)$$

где  $Q$  – производительность обработки, м<sup>3</sup>/с;  $P_z = \sigma \cdot Q / V_{кр}$  – тангенциальная составляющая силы резания, Н;  $\sigma$  – условное напряжение резания (энергоемкость обработки), Н/м<sup>2</sup>;  $K_{ш} = P_z / P_y$  – коэффициент шлифования;  $V_{кр}$  – скорость круга, м/с.

В работе [5] установлено, что условное напряжение резания  $\sigma$  описывается аналитической зависимостью:

$$\sigma = \frac{4 \cdot \tau_{сдв}}{K_{ш}}, \quad (2)$$

где  $\tau_{сдв}$  – предел прочности на сдвиг обрабатываемого материала, Н/м<sup>2</sup>.

Тогда зависимость (1) опишется:

$$Q_{y\delta} = \frac{4 \cdot \tau_{сдв} \cdot V_{кр}}{\sigma^2}. \quad (3)$$

Из зависимости (3) вытекает, что наибольшее влияние на удельную интенсивность шлифования  $Q_{y\delta}$  оказывает условное напряжение резания  $\sigma$ : чем оно меньше, тем больше  $Q_{y\delta}$  и выше эффективность шлифования. Зависимость (3) в обобщенном виде связывает  $Q_{y\delta}$  и  $\sigma$ , указывая на то, что условное напряжение резания  $\sigma$  является основным параметром силовой напряженности процесса шлифования.

В условиях микрорезания единичным зерном условное напряжение резания  $\sigma$  описывается зависимостью [6]:

$$\sigma = \frac{2 \cdot \tau_{сдв}}{\sqrt{\frac{a}{2 \cdot R} - \operatorname{tg} \frac{\psi}{2}}}, \quad (4)$$

где  $a$  – толщина среза, м;  $R$  – радиус режущего зерна, м;  $\psi$  – условный угол трения абразивного зерна с обрабатываемым материалом ( $\operatorname{tg} \psi = f$  – коэффициент трения).

Подставляя зависимость (4) в (3), имеем:

$$Q_{y\delta} = \frac{V_{кр}}{\tau_{сдв}} \cdot \left( \sqrt{\frac{a}{2 \cdot R} - \operatorname{tg} \frac{\psi}{2}} \right)^2. \quad (5)$$

Как видно, увеличить удельную интенсивность шлифования  $Q_{y\delta}$  и тем самым повысить эффективность шлифования можно увеличением скорости круга  $V_{кр}$ , толщины среза  $a$  и уменьшением радиуса округления абразивного зерна  $R$  и интенсивности трения зерна с обрабатываемым материалом. Увеличение предела прочности на сдвиг обрабатываемого материала  $\tau_{сдв}$  приводит к снижению  $Q_{y\delta}$ , что согласуется с известными экспериментальными данными.

По мере износа зерна в процессе резания его радиус  $R$  увеличивается, что ведет к уменьшению удельной интенсивности шлифования  $Q_{y\delta}$ . При условии

$\sqrt{\frac{a}{2 \cdot R}} \rightarrow \operatorname{tg} \frac{\psi}{2}$  имеем  $Q_{y\partial} \rightarrow 0$ , т.е. процесс съема материала при шлифовании фактически прекращается. Поэтому важнейшим условием повышения эффективности шлифования является уменьшение величины линейного износа зерен, не допуская образования на них площадок износа. Это может быть достигнуто за счет применения эффективных методов правки круга или обеспечения процесса самозатачивания круга. Важно также увеличивать толщины срезов, а за счет применения эффективных технологических сред – уменьшать интенсивность трения режущих зерен с обрабатываемым материалом, определяемую тригонометрической функцией  $\operatorname{tg} \frac{\psi}{2}$ .

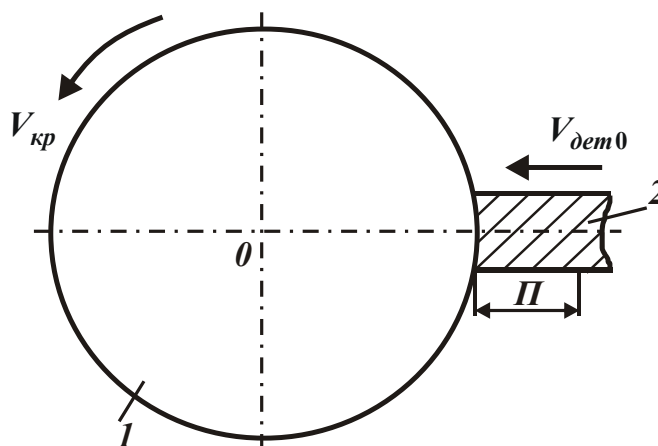


Рис. 1 – Расчетная схема процесса шлифования: 1 – круг; 2 – деталь

При шлифовании по схеме, показанной на рис. 1, при съеме припуска величиной  $H$  максимальная толщина среза отдельным зерном круга определяется зависимостью [5]:

$$H_{max} = \sqrt[3]{\frac{9 \cdot b \cdot V_{дем0}}{\operatorname{tg} \gamma \cdot k \cdot V_{кр}}}, \quad (6)$$

где  $b$  – максимальная высота выступания вершин зерен круга над уровнем связки, м;  $k$  – поверхностная концентрация зерен круга, шт./м<sup>2</sup>;  $\gamma$  – половина угла при вершине конусообразного режущего зерна.

В условиях прерывистого шлифования скорость съема металла  $V_{дем} = V_{дем0} \cdot (l_{01} + l_{02}) / l_{01}$  [7], тогда зависимость (6) примет вид:

$$H_{max} = \sqrt[3]{\frac{9 \cdot b \cdot V_{dem0} \cdot \left(1 + \frac{l_{02}}{l_{01}}\right)}{tg\gamma \cdot k \cdot V_{кр}}}, \quad (7)$$

где  $V_{dem0}$  – скорость детали при обычном шлифовании сплошным кругом, м/с;  
 $l_{01}$ ,  $l_{02}$  – длины рабочего выступа и впадины прерывистого круга, м.

Следовательно, чем больше длина впадины прерывистого круга  $l_{02}$ , тем больше скорость съема металла  $V_{dem}$  и соответственно максимальная толщина среза отдельным зерном круга, определяемая преобразованной зависимостью (7). Увеличение максимальной толщины среза отдельным зерном круга  $H_{max} = a$ , согласно зависимости (5), ведет к увеличению удельной интенсивности шлифования  $Q_{yd}$ . Следовательно, при прерывистом шлифовании параметр  $Q_{yd}$  больше, чем при обычном шлифовании сплошным кругом.

С другой стороны, увеличение максимальной толщины среза отдельным зерном круга приводит к увеличению нагрузки, действующей на зерно, и вероятности его выпадения из связки при меньшем линейном износе, что предполагает реализацию режима самозатачивания круга. В результате радиус округления абразивного зерна  $R$  уменьшается, что также приводит к увеличению удельной интенсивности шлифования  $Q_{yd}$  и повышению эффективности процесса шлифования. Однако при этом увеличивается интенсивность износа прерывистого круга, т.е. эффективность обработки достигается в первую очередь за счет постоянного обновления режущего контура круга и поддержания его высокой режущей способности в процессе шлифования. Таким образом показано, что при прерывистом шлифовании обеспечивается увеличение отношения  $a/R$ , что согласно зависимости (5), предполагает повышение режущей способности шлифовального круга и производительности обработки.

При шлифовании по упругой схеме с фиксированным радиальным усилием  $P_y = P_z / K_{ш} = \sigma \cdot Q / K_{ш} \cdot V_{кр}$  удельная интенсивность шлифования  $Q_{yd}$  определяется зависимостью:

$$Q_{yd} = \frac{K_{ш} \cdot V_{кр}}{\sigma}. \quad (8)$$

В итоге пришли к зависимости (1), т.е. закономерности формирования удельной интенсивности шлифования  $Q_{yd}$  при шлифовании по жесткой схеме (с  $Q = const$ ) и упругой схеме (с  $P_y = const$ ) одни и те же.

**Выводы.** В работе аналитически описана удельная интенсивность шлифования и показано, что определяющее влияние на ее изменение оказывает условное напряжение резания, являющееся основным параметром силовой напряженности процесса шлифования. С уменьшением условного напряжения резания удельная интенсивность шлифования увеличивается, что способствует повышению эффективности процесса шлифования. Аналитически установлено, что при прерывистом шлифовании условное напряжение резания меньше, а удельная интенсивность шлифования больше, чем при обычном шлифовании сплошным кругом, вследствие увеличения отношения толщины среза отдельным зерном круга к радиусу округления зерна. Это позволило обосновать технологические возможности прерывистого шлифования с позиции механики процесса резания.

**Список литературы:** 1. Якимов А.В. Абразивно-алмазная обработка фасонных поверхностей / А.В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1984. – 212 с. 2. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования / А.В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1975. – 175 с. 3. Марчук В.І. Умови підвищення якості та ефективності безцентрового шліфування тіл кочення роликотідшипників в умовах переналагоджувального виробництва / В.І. Марчук, Ю.А. Лукьянчук // Сучасні системи технологій у машинобудуванні. Збірник наукових праць, присвячений 90-річчю з дня народження професора Одеського національного політехнічного університету (ОНПУ) Якімова О.В. – Д.: ЛІРА. – 2015. – С. 60–68. 4. Попов С.А. Алмазно-абразивная обработка металлов и твердых сплавов / С.А. Попов, Н.П. Малевский, Л.М. Терещенко. – М.: Машиностроение, 1977. – 263 с. 5. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якімова. В десяти томах. – Т. 1. "Механика резания материалов" – Одесса: ОНПУ, 2002. – 580 с. 6. Андिलाхай А.А. Научные основы эффективной отделочной абразивной обработки деталей затопленными струями: автореф. дис. на соискание научн. степени докт. техн. наук : спец. 05.02.08 "Технология машиностроения" / А.А. Андिलाхай. – Одесса, 2013. – 47 с. 7. Якимов А.В. Физическая сущность и технологические возможности прерывистого шлифования / А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков // Сучасні системи технологій у машинобудуванні. Збірник наукових праць, присвячений 90-річчю з дня народження професора Одеського національного політехнічного університету (ОНПУ) Якімова О.В. – Д.: ЛІРА. – 2015. – С. 38-43.

**Bibliography (transliterated):** 1. Yakimov A.V. Abrazivno-almaznaya obrabotka fasonnykh poverkhnostey / A.V. Yakimov. – M.: Mashinostroenie, 1984. – 212 s. 2. Yakimov A.V. Optimizatsiya protsessha shlifovaniya / A.V. Yakimov. – M.: Mashinostroenie, 1975. – 175 s. 3. Marthuk V.I. Umovy pidvyshennya yakosti ta efektyvnosti beztsentrovogo shlifuvannya til kothennya rolykopidshypnykiv v umovakh perenalagodzhualynogo vyrobnytstva / V.I. Marthuk, Y.A. Lukyanthuk // Suthasni sustemy tekhnologiy u

mashynobuduvanni. Zbirnyk naukovykh prats, prysvyathenyi 90-riththyu z dnya narodzhennya profesora Odesjkogo natsionalnogo politekhnithnogo universytetu (ONPU) Yakimova O.V. – D.: LIRA. – 2015. – S. 60–68. 4. *Popov S.A.* Abrazivno-almaznaya obrabotka metallov i tverdykh splavov / *S.A. Popov, N.P. Malevskiy, L.M. Terethenko.* – M.: Mashinostroenie, 1977. – 263 s. 5. Fiziko-matematicheskaya teoriya protsessov obrabotki materialov i tekhnologiy mashinostroeniya / Pod obsh. red. *F.V. Novikova i A.V. Yakimova.* V 10 tomakh. – T. 1. "Mekhanika rezaniya materialov" – Odessa: ONPU, 2002. – 580 s. 6. *Andilakhay A.A.* Nauthnye osnovy effektivnoy otdelothnoy abrazivnoy obrabotki detaley zatoplennymi struyami: avtoref. dis. na soiskanie nauthn. stepeni dokt. tekhn. nauk : spets. 05.02.08 "Tekhnologiya mashinostroeniya" / *A.A. Andilakhay.* – Odessa, 2013. – 47 s. 7. *Yakimov A.V.* Fizicheskaya sushnosty i tekhnologicheskije vozmozhnosti preryvistogo shlifovaniya / *A.V. Yakimov, F.V. Novikov, G.V. Novikov* // Suthasni sustemy tekhnologiy u mashynobuduvanni. Zbirnyk naukovykh prats, prysvyathenyi 90-riththyu z dnya narodzhennya profesora Odesjkogo natsionalnogo politekhnithnogo universytetu (ONPU) Yakimova O.V. – D.: LIRA. – 2015. – S. 38-43.

*Надійшла до редакції 10.07.2015*