

УСЛОВИЯ УМЕНЬШЕНИЯ СИЛЫ И ТЕМПЕРАТУРЫ РЕЗАНИЯ ПРИ ОБЫЧНОМ И ПРЕРЫВИСТОМ ШЛИФОВАНИИ

В работе получены новые аналитические решения об условиях уменьшения силы и температуры резания при обычном и прерывистом шлифовании с учетом процессов резания и трения связки круга с обрабатываемым материалом. Теоретически установлено, что при прерывистом шлифовании в связи с динамическим характером взаимодействия рабочего выступа круга с обрабатываемым материалом фактически отсутствуют упругие перемещения в технологической системе. Это способствует повышению производительности обработки. Температура резания при этом изменяется по экстремальной зависимости с увеличением длины рабочего выступа прерывистого круга, принимая минимальное значение при равенстве длины впадины и рабочего выступа круга.

Ключевые слова: прерывистое шлифование, прерывистый круг, сила резания, температура резания.

Введение. При обработке высокоточных деталей гидроаппаратуры, изготовленных из материалов с повышенными физико-механическими свойствами, постоянно возникает проблема повышения эффективности финишной абразивной обработки, которая, как правило, осуществляется методами обработки свободным абразивом и характеризуется высокой трудоемкостью. В настоящее время появились абразивные круги с новыми характеристиками, позволяющие снизить силовую и тепловую напряженность процесса шлифования, повысить точность и качество обрабатываемых поверхностей. Перспективным направлением следует также рассматривать применение прерывистых кругов, обеспечивающих уменьшение силы и температуры резания. Однако, возможности шлифования этими кругами изучены недостаточно, что требует проведения дополнительных исследований.

Анализ последних исследований и литературы. Вопросам прерывистого шлифования в научно-технической литературе уделено достаточно большое внимание [1-3]. Профессором Якимовым А.В. [1] теоретически и экспериментально раскрыта физическая сущность условий уменьшения температуры резания при прерывистом шлифовании, благодаря чему этот метод обработки получил достаточно широкое применение на практике. Однако, добиться положительных результатов от использования прерывистого шлифования с точки зрения повышения качества и производительности обработки удастся не всегда, в особенности при шлифовании труднообрабатываемых материалов. Поэтому актуальны вопросы теоретического обоснования возможностей снижения силы и температуры резания при прерывистом шлифовании.

Целью данной статьи является определение условий уменьшения силы и температуры резания при прерывистом шлифовании на основе применения новых подходов к математическому моделированию процесса шлифования.

Постановка проблемы. В работе решается задача теоретического определения силы и температуры резания при обычном и прерывистом шлифовании с

учетом процессов резания и трения связки круга с обрабатываемым материалом.

Материалы исследований. Согласно схемы шлифования прямолинейной детали, движущейся по нормали к рабочей поверхности круга со скоростью V_{dem} , тангенциальную P_z и радиальную P_y составляющие силы резания описываются [4]:

$$P_z = \frac{\sigma \cdot F \cdot V_{dem0}}{V_{sp}} + f_1 \cdot c \cdot (V_{dem} - V_{dem0}) \cdot \tau; \quad (1)$$

$$P_y = \frac{\sigma \cdot F \cdot V_{dem0}}{V_{sp}} \cdot \operatorname{tg}(\psi + \gamma) + c \cdot (V_{dem} - V_{dem0}) \cdot \tau, \quad (2)$$

где σ – условное напряжение резания, Н/м²; F – площадь поперечного сечения обрабатываемого прямолинейного образца, м²; V_{dem0} – фактическая линейная скорость съема материала, м/с ($V_{dem0} \leq V_{dem}$); V_{sp} – скорость круга, м/с; ψ – условный угол трения зерна с обрабатываемым материалом; γ – условный (отрицательный) передний угол зерна; c – жесткость технологической системы, Н/м; f_1 – коэффициент трения связки круга с материалом.

Исходя из зависимостей (1) и (2), составляющие силы резания P_z и P_y с течением времени обработки τ неограниченно увеличиваются. Это приводит к снижению точности, качества и производительности обработки.

С учетом аналитической зависимости для определения условного напряжения резания

$$\sigma = \frac{2 \cdot \tau_{сдв}}{\operatorname{tg}\left(45^\circ - \frac{(\psi + \gamma)}{2}\right)}, \quad (3)$$

приведенной в работе [5], зависимости (1) и (2) примет вид:

$$P_z = \frac{2 \cdot \tau_{сдв} \cdot F \cdot V_{dem0}}{\operatorname{tg}\left(45^\circ - \frac{(\psi + \gamma)}{2}\right) \cdot V_{sp}} + f_1 \cdot c \cdot (V_{dem} - V_{dem0}) \cdot \tau; \quad (4)$$

$$P_z = \frac{2 \cdot \tau_{сдв} \cdot F \cdot V_{дем0} \cdot \operatorname{tg}(\psi + \gamma)}{\operatorname{tg}\left(45^\circ - \frac{(\psi + \gamma)}{2}\right) \cdot V_{кр}} + c \cdot (V_{дем} - V_{дем0}) \cdot \tau, \quad (5)$$

где $\tau_{сдв}$ – предел прочности на сдвиг обрабатываемого материала, Н/м².

Как видно, по мере износа и затупления режущих зерен круга увеличивается их отрицательный передний угол γ , что ведет к фактически неограниченному увеличению составляющих силы резания P_z и P_y . Причем, в значительно большей степени радикальной составляющей силы резания P_y , т.к. зависимость (2) содержит еще и множитель $\operatorname{tg}(\psi + \gamma)$, который более интенсивно увеличивается с увеличением угла γ , чем множитель $\frac{2 \cdot \tau_{сдв}}{\operatorname{tg}\left(45^\circ - \frac{(\psi + \gamma)}{2}\right)}$. Следовательно,

исходя из такого представления процесса шлифования, в начальный период обработки в зависимостях (1) и (2) будут преобладать первые слагаемые, которые и определяют интенсивное увеличение P_z и P_y с увеличением времени обработки τ . Затем, через определенное время обработки τ вторые слагаемые могут превысить первые слагаемые и увеличение P_z и P_y будет происходить за счет увеличения вторых слагаемых. В особой мере это будет проявляться в условиях обычного абразивного шлифования при работе круга в режиме затупления.

Повысить эффективность процесса шлифования можно применением кругов с прерывистой рабочей поверхностью. В связи с прерывистым характером шлифования в начальный момент взаимодействия рабочего выступа круга с обрабатываемым материалом технологическая система не успевает среагировать на импульс силы и получить соответствующее упругое перемещение. Это вытекает из аналитической зависимости для определения амплитуды колебаний от действия кратковременной силы резания без учета диссипативных сил [6]:

$$y = y_{см} \cdot (1 - \cos k\tau), \quad (3)$$

где $y_{см}$ – статическое перемещение в технологической системе, м; $k = \sqrt{c/m}$ – собственная частота системы, Гц; c – жесткость технологической системы, Н/м; τ – время обработки, с.

При относительно небольшом значении $k\tau < \pi/2$ амплитуда колебаний $y \rightarrow 0$. В работе [3] показано, что собственная частота упругой системы плоскошлифовального станка принимает значения $k = 0 \dots 50$ Гц. Время контакта рабочего выступа (длинной $l_{01} = 20$ мм) прерывистого круга с обрабатываемым материалом при $V_{кр} = 40$ м/с равно

$$\tau = \frac{l_{01}}{V_{кр}} = \frac{20 \text{ мм}}{40 \cdot 10^3 \text{ мм/с}} = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ с.}$$

Произведение $k\tau$ для $k = 300$ Гц равно: $k\tau = 300 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ с} = 0,15$. Период колебаний упругой системы станка

$$T = 2\pi = 6,28. \text{ Тогда } \frac{T}{k\tau} = \frac{6,28}{0,15} = 41,9, \text{ т.е. время кон-}$$

такта рабочего выступа прерывистого круга с обрабатываемым материалом значительно меньше периода колебаний упругой системы станка T . Следовательно, согласно зависимости (3), величина упругого перемещения y будет значительно меньше величины $y_{см}$. Это будет способствовать более глубокому внедрению зерен в обрабатываемый материал и повышению интенсивности съема материала, что фактически исключит из зависимостей (1) и (2) вторые слагаемые, связанные с возникновением в технологической системе упругих перемещений. Следовательно, при прерывистом шлифовании реализуемы условия $V_{дем0} \rightarrow V_{дем}$, что предопределяет постоянство во времени составляющих силы резания P_z и P_y .

Необходимо отметить, что при прерывистом шлифовании вследствие более глубокого внедрения режущих зерен в обрабатываемый материал их отрицательный передний угол γ будет меньше, что, согласно зависимостей (4) и (5), приведет к уменьшению составляющих силы резания P_z и P_y . Собственно этим и можно объяснить уменьшение силовой напряженности прерывистого шлифования по сравнению с обычным шлифованием. Кроме того, в условиях прерывистого шлифования, в связи с более интенсивным обновлением режущего рельефа круга и увеличением выступления режущих зерен над уровнем связки, уменьшается интенсивность трения связки и зерен с обрабатываемым материалом, т.е. уменьшаются параметры ψ и f_1 , что приводит к дополнительному уменьшению P_z и P_y .

Полученные теоретические решения согласуются с известными экспериментальными данными. Так, в работе [1] установлено, что при обычном абразивном шлифовании деталей из стали X12M абразивным кругом Э9А25СМ2К с течением времени обработки τ составляющие силы резания P_z и P_y непрерывно увеличиваются, а при прерывистом шлифовании фактически остаются постоянными. Установлено также, что удельный съем металла $K = Q/P_y$ с течением времени обработки при обычном абразивном шлифовании уменьшается, а при прерывистом шлифовании фактически остается постоянным [1]. Исходя из зависимостей (1) и (2), постоянство составляющих силы резания P_z и P_y с течением времени обработки τ при прерывистом шлифовании связано с выполнением условия $V_{дем0} \approx V_{дем}$, в результате чего вторые слагаемые в зависимостях (1) и (2) фактически равны нулю и поэтому P_z и P_y не зависят от τ . При обычном абразивном шлифовании выполняется условие $V_{дем} > V_{дем0}$, что приводит к увеличению составляющих силы резания P_z и P_y с течением времени τ .

Температура резания при шлифовании θ определяется зависимостью:

$$\theta = \frac{q \cdot l_2}{\lambda} = \left[\sigma \cdot V_{дем0} + \frac{f_1 \cdot c \cdot (V_{дем} - V_{дем0}) \cdot V_{кр} \cdot \tau}{F} \right] \times \sqrt{\frac{2 \cdot \tau}{c_m \cdot \rho \cdot \lambda}}, \quad (4)$$

где $q = \frac{P_z \cdot V_{кр}}{F}$ – плотность теплового потока, Вт/м²;

$l_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda \cdot \tau}{c_m \cdot \rho}}$ – глубина проникновения возникающе-

го при шлифовании тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали, м; λ – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/(м·К); c_m – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(кг·К); ρ – плотность материала, кг/м³.

Наличие в зависимости (4) второго слагаемого, обусловленного трением связки круга с обрабатываемым материалом, позволяет по-новому раскрыть технологические закономерности изменения температуры резания при шлифовании θ . Так, из зависимости (4) следует, что с увеличением параметров f_1 , c , $(V_{дем} - V_{дем0})$, $V_{кр}$, τ и уменьшением F температура резания увеличивается. Это ведет к снижению качества обрабатываемых поверхностей и производительности обработки и согласуется с известными экспериментальными данными.

Из зависимости (4) следует, что уменьшить температуру резания при шлифовании θ можно различными путями, например, уменьшая первое и второе слагаемые зависимости (4), а также уменьшая время обработки τ . Однако уменьшение параметров $V_{дем0}$ и τ неэффективно, т.к. это ведет к снижению производительности обработки. В связи с этим, основным условием уменьшения температуры резания при шлифовании θ следует рассматривать выполнение условия $V_{дем0} = V_{дем}$ за счет исключения в процессе шлифования трения связки круга с обрабатываемым материалом. Как отмечалось выше, это может быть достигнуто путем применения прерывистого шлифования или эффективных методов правки круга, обеспечивающих его высокую режущую способность.

Температуру резания при прерывистом шлифовании θ можно аналитически установить следующим образом. Время контакта рабочего выступа прерывистого круга (длиной l_{01}) с обрабатываемым материалом равно $\tau = l_{01}/V_{кр}$. Неудаленный материал за время прохождения впадиной прерывистого круга (длиной l_{02}) зоны шлифования удаляется последующим рабочим выступом круга с большей скоростью:

$$V_{дем0_1} = V_{дем0} \cdot \frac{(l_{01} + l_{02})}{l_{01}} = V_{дем0} \cdot \left(1 + \frac{l_{02}}{l_{01}}\right). \quad (5)$$

Следовательно, чем больше отношение l_{02}/l_{01} , тем больше скорость $V_{дем0_1}$. Подставляя зависимость (5) в зависимость (4) без учета второго слагаемого и с учетом $\tau = l_{01}/V_{кр}$, получено

$$\theta = \sigma \cdot V_{дем0} \cdot \left(\sqrt{l_{01}} + \frac{l_{02}}{\sqrt{l_{01}}}\right) \cdot \sqrt{\frac{2}{c_m \cdot \rho \cdot \lambda \cdot V_{кр}}}. \quad (6)$$

Согласно данной зависимости, увеличение скорости круга $V_{кр}$ способствует снижению температуры резания при прерывистом шлифовании θ . Неодно-

значное влияние на θ оказывает длина рабочего выступа прерывистого круга l_{01} . В связи с этим важно установить характер изменения температуры резания при прерывистом шлифовании θ в зависимости от длины l_{01} . Для этого следует подчинить зависимость (6) необходимому условию экстремума:

$$\theta'_{l_{01}} = \sigma \cdot V_{дем0} \cdot \sqrt{\frac{2}{c_m \cdot \rho \cdot \lambda \cdot V_{кр}}} \cdot (0,5 \cdot l_{01}^{-0,5} - 0,5 \cdot l_{01}^{-1,5} \cdot l_{02}) = 0. \quad (7)$$

Откуда

$$l_{01} = l_{02}. \quad (8)$$

Для определения характера экстремума функции θ следует установить знак ее второй производной в точке экстремума, т.е. в точке $l_{01} = l_{02}$:

$$\theta''_{l_{01}} = \sigma \cdot V_{дем0} \cdot \sqrt{\frac{2}{c_m \cdot \rho \cdot \lambda \cdot V_{кр}}} \cdot 0,5 \cdot l_{01}^{-1,5}. \quad (9)$$

Как видно, в точке экстремума $l_{01} = l_{02}$ вторая производная функции θ принимает положительное значение. Это указывает на наличие минимума функции θ (рис. 1).

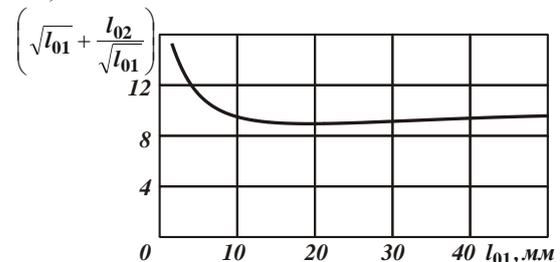


Рис. 1 – Зависимость множителя $\left(\sqrt{l_{01}} + \frac{l_{02}}{\sqrt{l_{01}}}\right)$ от длины рабочего выступа прерывистого круга l_{01} для $l_{02} = 20$ мм

Этим доказана эффективность применения прерывистого шлифования с точки зрения снижения температуры резания при шлифовании θ .

Результаты исследований. Чтобы оценить истинные технологические возможности прерывистого шлифования, необходимо зависимость (6) представить в виде:

$$\theta = \sigma \cdot V_{дем0} \cdot \left(1 + \frac{l_{02}}{l_{01}}\right) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \tau}{(2 \cdot n) \cdot c_m \cdot \rho \cdot \lambda}}, \quad (10)$$

где n – количество рабочих выступов прерывистого круга для $l_{01} = l_{02}$.

После преобразований окончательно зависимость (10) выразится:

$$\theta = \sigma \cdot V_{дем0} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \tau}{(0,5 \cdot n) \cdot c_m \cdot \rho \cdot \lambda}} = \frac{\theta_0}{\sqrt{0,5 \cdot n}}, \quad (11)$$

где $\theta_0 = \sigma \cdot V_{дем0} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \tau}{c_m \cdot \rho \cdot \lambda}}$ – температура резания при обычном шлифовании сплошным кругом.

Как видно, зависимость (11) отличается от исходной зависимости (6), справедливой для обычного шлифования сплошным кругом, наличием в знамена-

теле множителя $(0,5 \cdot n)$. С увеличением этого множителя температура резания при прерывистом шлифовании θ уменьшается, что указывает на целесообразность использования прерывистых кругов. На рис. 2 показан характер изменения θ от n , установленный на основе зависимости (11).

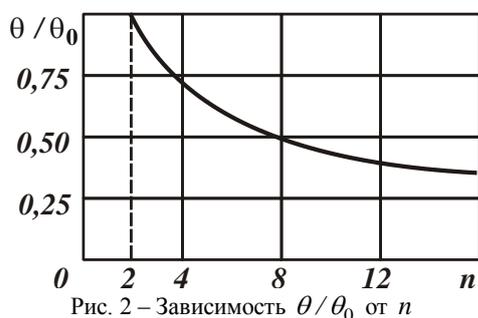


Рис. 2 – Зависимость θ/θ_0 от n

Как следует из рис. 2, с увеличением количества рабочих выступов прерывистого круга n от 2 до 8 отношение θ/θ_0 уменьшается в 2 раза, а при изменении n от 2 до 16 отношение θ/θ_0 уменьшается почти в 3 раза по сравнению с обычным шлифованием сплошным кругом. Полученные таким образом расчетные значения отношения θ/θ_0 согласуются с экспериментальными данными, приведенными в работе [1], что свидетельствует о достоверности разработанной расчетной схемы температуры резания при прерывистом шлифовании θ .

Необходимо отметить, что полученные расчетные значения отношения θ/θ_0 справедливы при условии полного охлаждения зоны шлифования за время прерывания процесса шлифования, т.е. за время прохождения впадины прерывистого круга зоны шлифования. Однако, как установлено в работе [1], выполнить на практике данное условие достаточно сложно, т.к. обрабатываемый металл за время прерывания процесса шлифования полностью не охлаждается. Это не позволяет реализовать на практике в полной мере преимущества прерывистого шлифования. Реально удастся уменьшить температуру резания при прерывистом шлифовании θ в меньшее количество раз, чем это установлено теоретически. Так, согласно экспериментальным данным, приведенным в работе [3], температура резания при шлифовании θ гарантированно может быть уменьшена на 40%. Это составляет достаточно большую величину, позволяющую в ряде случаев (при шлифовании сложнопрофильных поверхностей деталей, изготовленных из труднообрабатываемых материалов) обеспечить качественную обработку. Однако для более радикального решения проблемы снижения температуры резания и повышения качества обработки (исключения прижогов, микротрещин и других температурных дефектов) необхо-

димо обеспечить более существенное уменьшение температуры резания. Поэтому, используя полученное теоретическое решение, после проведения соответствующих исследований можно добиться уменьшения температуры резания θ более чем в 2-3 раза (согласно рис. 1).

Выводы. В работе получены новые аналитические решения об условиях уменьшения силы и температуры резания при обычном и прерывистом шлифовании с учетом процессов резания и трения связки круга с обрабатываемым материалом. Теоретически установлено, что при прерывистом шлифовании в связи с динамическим характером взаимодействия рабочего выступа круга с обрабатываемым материалом фактически отсутствуют упругие перемещения в технологической системе. Это способствует повышению производительности обработки. Температура резания при этом изменяется по экстремальной зависимости с увеличением длины рабочего выступа прерывистого круга, принимая минимальное значение при условии равенства длины впадины и рабочего выступа круга. За счет этого температура резания может быть уменьшена в 2-3 раза по сравнению с обычным шлифованием.

Список литературы: 1. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования [Текст] / А.В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1975. – 176 с. 2. Сипайлов В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности [Текст] / В.А. Сипайлов. – М.: Машиностроение, 1978. – 167 с. 3. Управление процессом шлифования / А.В. Якимов, А.Н. Паршаков, В.И. Свирщев и др. – К.: Техніка, 1983. – 184 с. 4. Рябенков И.А. Оценка влияния интенсивности трения связки круга с обрабатываемым материалом на эффективность процесса шлифования [Текст] / И.А. Рябенков, Ф.В. Новиков // Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – No 43 (1086). – С. 143–147. 5. Новиков Ф.В. Теоретичні основи механічної обробки високоточних деталей : монографія / Ф.В. Новиков, І.О. Рябенков. – Х. : Вид. ХНЕУ, 2013. – 352 с. 6. Качество и производительность абразивно-алмазной обработки: учеб. пособие [Текст] / А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков и др. – Одесса: ОГПУ, 1999. – 212 с.

Bibliography (transliterated): 1. Yakimov A.V. Optimizatsiya protsessa shlifovaniya [Text] / A.V. Yakimov. – Moscow: Mashinostroenie, 1975. – 176p. Print. 2. Sipaylov V.A. Teplovye protsessy pri shlifovaniy i upravlenie kachestvom poverkhnosti [Text] / V.A. Sipaylov. – Moscow: Mashinostroenie, 1978. – 167 p. Print. 3. Upravlenie protsessom shlifovaniya [Text] / A.V. Yakimov, A.N. Parshakov, V.I. Svirshchv i dr. – Kiev: Tekhnika, 1983. – 184 p. Print. 4. Rybenkov I.A. Otsenka vliyuy intensivnosti treniya svyazki kruga s obrabatyvaemym materialom na effektivnost protsessa shlifovaniya [Text] / I.A. Rybenkov, F.V. Novikov // Visnik NTU «KhPI». Zbirnyk naukovykh prats. Seriya: Innovatsiyni tekhnologiy ta obladnannya obrobki materialiv u mashinobuduvanni ta metalurgiy. – Kiev: NTU «KPI», 2014. – No 43 (1086). – pp. 143–147. Print. 5. Novikov F.V. Teoretychni osnovy mekhanichnoy obrobky vysokotochnykh detaley : monografiya / F.V. Novikov, I.O. Ryabenkov. – Kharkov : Vyd. KhNEU, 2013. – 352 p. Print. 6. Kachestvo i proizvoditelnost abrazivno-almaznoy obrabotki: ucheb. Posobie [Text] / A.V. Yakimov, F.V. Novikov, G.V. Novikov i dr. – Odessa: OGPU, 1999. – 212 p. Print.

Поступила (received) 28.03.2015

Новиков Федор Васильевич – док. техн. наук, проф. ХНЭУ, Харьков, тел.: (057)-695562, e-mail: fokusnic1@rambler.ru;

Рябенков Игорь Александрович – канд. техн. наук, ведущий инженер-технолог ГП ХМЗ «ФЭД», Харьков, тел.: (057)-7596631, e-mail: fokusnic1@rambler.ru.