

ЗАКОНОМЕРНОСТИ СНИЖЕНИЯ СИЛОВОЙ И ТЕПЛОВОЙ НАПРЯЖЕННОСТИ ПРЕРЫВИСТОГО ШЛИФОВАНИЯ

В работе теоретически обоснованы условия уменьшения параметров силовой и тепловой напряженности прерывистого шлифования, состоящие в уменьшении энергоемкости обработки в связи с ударным характером взаимодействия рабочего выступа прерывистого круга и обрабатываемого материала и возможностью поддержания его высокой режущей способности за счет осуществления высокопроизводительной правки прерывистого круга в процессе обработки, а также в уменьшении времени взаимодействия рабочего выступа прерывистого круга с обрабатываемым материалом. Показано, что при прерывистом шлифовании можно существенно уменьшить интенсивность трения связки круга с обрабатываемым материалом, являющегося основным очагом силовой и тепловой напряженности процесса шлифования. На этой основе раскрыты закономерности формирования тангенциальной составляющей силы резания и температуры резания при прерывистом шлифовании. Доказано, что существует оптимальное значение времени контакта рабочего выступа прерывистого круга с обрабатываемым материалом, обеспечивающее достижение минимальной температуры резания, и которое может быть использовано для расчета оптимального количества рабочих выступов и впадин на рабочей поверхности прерывистого круга, их протяженности и соответственно основных технико-экономических показателей прерывистого шлифования.

Ключевые слова: прерывистое шлифование, сила резания, температура резания, энергоемкость обработки, трение связки круга с материалом, рабочий выступ круга, правка круга.

Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важнейшими научными и практическими задачами. Прерывистое шлифование является одним из наиболее эффективных методов шлифования, обеспечивающих повышение качества и производительности обработки деталей машин. Основной эффект прерывистого шлифования состоит в снижении температуры резания за счет периодичности контакта прерывистого круга с обрабатываемым материалом и возможности частичного охлаждения зоны резания в момент прерывания процесса. Кроме того, в результате ударного характера взаимодействия прерывистого круга с обрабатываемой деталью происходит самооформление профиля круга (т.е. его постоянная правка), что приводит к непрерывному обновлению режущего рельефа круга и снижению энергоемкости обработки. Такой двойной эффект шлифования исключает образование на обрабатываемых поверхностях прижогов, микротрещин и других температурных дефектов и обеспечивает высококачественную обработку даже в условиях съема значительных припусков, т.е. метод прерывистого шлифования можно использовать как при окончательной, так и предварительной обработке. При этом актуальной задачей является проведение обобщенного теоретического анализа условий уменьшения силовой и тепловой напряженности прерывистого шлифования и определение оптимальных условий обработки. Исследования выполнены в соответствии с тематическим планом научно-практических работ Харьковского национального технического университета сельского хозяйства имени Петра Василенко.

Анализ последних достижений и публикаций. Физические и технологические основы прерывистого шлифования разработаны проф. Якимовым А.В. [1], в которых обоснованы прогрессивные конструкции прерывистых кругов, оптимальные режимы шлифования и даны практические рекомендации по эффективному применению прерывистого шлифования. В совместных работах Якимова А.В., Якимова А.А., Новикова Ф.В., Новикова Г.В. [2-5] разработаны теоретические основы прерывистого шлифования, состоящие в установлении функциональных связей между параметрами силовой и тепловой напряженности процесса шлифования и определении условий их уменьшения. Настоящая работа является дальнейшим развитием этих исследований и направлена на выявление, обоснование и реализацию новых резервов повышения эффективности прерывистого шлифования.

Цель работы – снижение силовой и тепловой напряженности прерывистого шлифования, повышения качества и производительности обработки на основе теоретического определения оптимальных условий прерывистого шлифования.

Материалы исследований. В работе [6] эффективность прерывистого шлифования предложено оценивать с позиции влияния на силы и температуру резания множителя $(1 + l_2 / l_1)$, характеризующего время прерывания процесса шлифования в момент прохождения впадины прерывистого круга зоны резания. В работе [7] показано, что условное напряжение резания (энергоемкость механической обработки) σ , в частности процесса шлифования, зависит от суммы условного переднего угла режущего зерна γ и условного угла трения режущего зерна с обрабатываемым материалом ψ :

$$\sigma = \frac{2 \cdot \tau_{сдв}}{\operatorname{tg}\left(45^\circ - \frac{(\psi + \gamma)}{2}\right)}, \quad (1)$$

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

Чем меньше эти углы, тем меньше энергоемкость обработки σ и выше эффективность шлифования. Очевидно, при прерывистом шлифовании, вследствие ударного характера взаимодействия рабочего выступа прерывистого круга с обрабатываемым материалом, процесс обновления режущего контура круга будет происходить интенсивнее, режущие зерна будут выступать над уровнем связки на большую высоту и будут острее. Поэтому условные углы γ и ψ будут меньше, чем при обычном шлифовании сплошным кругом. Согласно зависимости (1), это приведет к уменьшению энергоемкости обработки σ . Однако это может не привести к уменьшению тангенциальной составляющей силы резания $P_z = \sigma \cdot S_{мгн}$, которая зависит от производительности обработки $Q = Q_0 \cdot (1 + l_2 / l_1)$, достигаемой в момент контакта рабочего выступа прерывистого круга с обрабатываемым материалом:

$$P_z = \sigma \cdot \frac{Q_0 \cdot \left(1 + \frac{l_2}{l_1}\right)}{V_{кр}}, \quad (2)$$

где $S_{мгн} = Q / V_{кр}$ – мгновенная суммарная площадь поперечного сечения среза всеми одновременно работающими зернами круга, м²; Q_0 – производительность обработки при шлифовании сплошным кругом, м³/с; l_1, l_2 – соответственно, длины рабочего выступа и впадины прерывистого круга, м; $V_{кр}$ – скорость круга, м/с.

Поскольку рабочий выступ прерывистого круга вынужден удалять оставшийся после прохождения впадины слой металла, то очевидно, производительность обработки Q в момент прохождения рабочего выступа круга будет больше, чем при обычном шлифовании сплошным кругом Q_0 . Это приведет к увеличению тангенциальной составляющей силы резания P_z . Поэтому P_z зависит от двух противоположно изменяющихся параметров: σ и Q , первый из которых уменьшается, а второй увеличивается при прерывистом шлифовании.

Экспериментально установлено [1], что при прерывистом шлифовании, как правило, тангенциальная составляющая силы резания P_z меньше, чем при обычном шлифовании сплошным кругом. Следовательно, интенсивность уменьшения энергоемкости обработки σ выше интенсивности увеличения множителя $(1 + l_2 / l_1)$. Это связано с тем, что отношение (l_2 / l_1) изменяется в небольших пределах и не приводит к существенному увеличению множителя $(1 + l_2 / l_1)$ и соответственно тангенциальной составляющей силы резания P_z , тогда как даже незначительное уменьшение σ приводит к ощутимому (пропорциональному) уменьшению P_z . В этом и состоит физическая сущность снижения силовой напряженности прерывистого шлифования: за счет уменьшения суммы углов $(\psi + \gamma)$ уменьшается σ , а это предопределяет уменьшение P_z и соответственно температуры резания.

ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

В работе [8] показано, что в общем случае тангенциальная составляющая силы резания P_z определяется двумя составляющими, обусловленными процессом резания и процессом трения связки круга с обрабатываемым материалом (рис. 1):

$$P_z = \frac{\sigma \cdot F \cdot V_{\text{дет}0}}{V_{\text{кр}}} + f_1 \cdot c \cdot (V_{\text{дет}} - V_{\text{дет}0}) \cdot \tau, \quad (3)$$

где F – площадь поперечного сечения среза обрабатываемого прямолинейного образца (детали), м²; $V_{\text{дет}}$ – скорость детали, м/с; $V_{\text{дет}0}$ – фактическая линейная скорость съема материала, м/с ($V_{\text{дет}0} \leq V_{\text{дет}}$); f_1 – коэффициент трения связки круга с обрабатываемым материалом; c – жесткость технологической системы, Н/м; τ – время контакта круга с фиксированным сечением обрабатываемой поверхности, с.

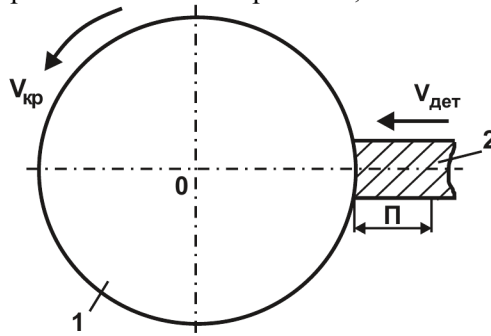


Рис. 1. Расчетная схема параметров процесса шлифования прямолинейного образца, движущегося по нормали к рабочей поверхности круга: 1 – круг; 2 – деталь

Данная зависимость справедлива для обычного шлифования сплошным кругом. При прерывистом шлифовании, вследствие более высокого выступания режущих зерен над уровнем связки круга и их более высокой остроты, трение связки круга с обрабатываемым материалом будет меньше, чем при обычном шлифовании сплошным кругом. Поэтому в первом приближении вторым слагаемым зависимости (3) можно пренебречь, т.к. $V_{\text{дет}0} \approx V_{\text{дет}}$. В итоге это приведет к снижению тангенциальной составляющей силы резания P_z . Кроме того, уменьшение энергоемкости обработки σ в первом слагаемом зависимости (3) также приведет к снижению P_z при прерывистом шлифовании. Однако при этом необходимо вместо $V_{\text{дет}0}$ рассматривать $V_{\text{дет}0} \cdot (1 + l_2 / l_1)$. Тогда зависимость (3) примет вид:

$$P_z = \frac{\sigma \cdot F \cdot V_{\text{дет}0} \cdot \left(1 + \frac{l_2}{l_1}\right)}{V_{\text{кр}}}. \quad (4)$$

Температура резания θ при прерывистом шлифовании аналитически описывается:

$$\theta = \frac{q \cdot l}{\lambda} = \frac{\sigma \cdot V_{\text{дет}0} \cdot \left(1 + \frac{l_2}{l_1}\right)}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda \cdot \tau}{c_m \cdot \rho}}, \quad (5)$$

где $q = \frac{N}{F} = \frac{P_z \cdot V_{\text{кр}}}{F}$ – плотность теплового потока, Вт/м²; $l = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda \cdot \tau}{c_m \cdot \rho}}$ – глубина проникновения образующегося в процессе шлифования тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали, м; $N = P_z \cdot V_{\text{кр}}$ – мощность шлифования, Вт; λ – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/м·К; c_m – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/кг·К; ρ – плотность обрабатываемого материала, кг/м³.

С учетом выражения $\tau = l_1 / V_{\text{кр}}$ зависимость (5) примет вид:

$$\theta = \sigma \cdot V_{\text{дет}0} \cdot \left(\sqrt{l_1} + \frac{l_2}{\sqrt{l_1}} \right) \cdot \sqrt{\frac{2}{c_m \cdot \rho \cdot \lambda \cdot V_{\text{кр}}}}. \quad (6)$$

Как видно, имеет место экстремум температуры резания θ от длины рабочего выступа прерывистого круга l_1 . Подчиняя функцию θ необходимому условию экстремума $\theta'_1 = 0$, получено: $l_1 = l_2$, т.е. экстремальные значения длины рабочего выступа и впадины прерывистого круга одинаковы.

Вторая производная $\theta''_1 > 0$, следовательно, в точке экстремума достигается минимум температуры резания θ . Этим показано, что добиться наименьшей температуры резания при прерывистом шлифовании можно при условии $l_1 = l_2$, тогда:

$$\theta_{min} = \sigma \cdot V_{dem0} \cdot \sqrt{\frac{8 \cdot l_1}{c_m \cdot \rho \cdot \lambda \cdot V_{кр}}} \quad (7)$$

Применительно к шлифованию сплошным кругом при условиях $l_2 = 0$ и $\tau = 2 \cdot l_1 / V_{кр}$ зависимость (5) принимает вид:

$$\theta = \sigma \cdot V_{dem0} \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot l_1}{c_m \cdot \rho \cdot \lambda \cdot V_{кр}}} \quad (8)$$

Как видно, при шлифовании сплошным кругом температура резания θ меньше, чем при прерывистом шлифовании. Однако при этом следует учитывать, что энергоемкость обработки σ при прерывистом шлифовании меньше, а дополнительное охлаждение зоны резания в момент прерывания процесса шлифования также приводит к снижению температуры резания θ_{min} . Поэтому, очевидно, температура резания θ_{min} при прерывистом шлифовании будет меньше, чем при шлифовании сплошным кругом, что подтверждается известными экспериментальными данными. Таким образом, увеличение температуры резания θ_{min} при прерывистом шлифовании вследствие того, что рабочий выступ прерывистого круга вынужден удалять оставшийся после прохождения впадины слой металла, с избытком компенсируется уменьшением энергоемкости обработки σ и дополнительным охлаждением зоны резания в момент прерывания процесса шлифования. Это приводит к снижению температуры резания θ_{min} при прерывистом шлифовании, что согласуется с экспериментальными данными.

Из проведенного анализа следует, что температура резания зависит в основном от двух параметров: P_z и $l = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda \cdot \tau}{c \cdot \rho}}$. Как показано выше, тангенциальная составляющая силы

резания P_z при прерывистом шлифовании может быть меньше, чем при обычном шлифовании сплошным кругом. Время контакта рабочего выступа прерывистого круга с обрабатываемым материалом τ и соответственно параметр l также меньше при прерывистом шлифовании вследствие периодичности процесса резания. Поэтому температура резания θ_{min} при прерывистом шлифовании меньше, что подтверждается известными экспериментальными данными. Как видно, уменьшение температуры резания θ_{min} при прерывистом шлифовании происходит по двум каналам: путем уменьшения P_z и τ . Это указывает на значительные технологические возможности прерывистого шлифования, так как ни один из известных методов шлифования не обладает таким преимуществом – одновременно за счет снижения энергоемкости обработки и обеспечения дополнительного охлаждения зоны резания в момент прохождения впадины прерывистого круга – добиться существенного снижения температуры резания и исключить образование температурных дефектов на обрабатываемых поверхностях без снижения производительности обработки. Этим подтверждается высокая эффективность практического применения предложенного профессором Якимовым А.В. прогрессивного метода прерывистого шлифования. Полученные решения использованы в производстве на операции прерывистого шлифования твердосплавных пластин, в результате чего достигнуто повышение качества и производительности обработки.

Выводы. Теоретически обоснованы условия уменьшения параметров силовой и тепловой напряженности прерывистого шлифования, состоящие в уменьшении энергоемкости обработки в связи с ударным характером взаимодействия рабочего выступа прерывистого круга и обрабатываемого материала и возможности осуществления высокопроизводительной правки круга в процессе обработки, а также в уменьшении времени взаимодействия рабочего выступа

ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

круга с обрабатываемым материалом. Показано, что при прерывистом шлифовании можно существенно уменьшить интенсивность трения связки круга с обрабатываемым материалом, являющегося основным очагом силовой и тепловой напряженности процесса шлифования. На этой основе раскрыты закономерности формирования тангенциальной составляющей силы резания и температуры резания при прерывистом шлифовании. Доказано, что существует оптимальное значение времени контакта рабочего выступа прерывистого круга с обрабатываемым материалом, обеспечивающее достижение минимальной температуры резания, и которое может быть использовано для расчета оптимального количества рабочих выступов и впадин на рабочей поверхности прерывистого круга, их протяженности и соответственно основных технико-экономических показателей прерывистого шлифования.

Перспективы дальнейшей работы в данном направлении. В последующих работах следует теоретически установить влияние времени прерывания контакта прерывистого круга с обрабатываемым материалом на уменьшение температуры резания с учетом подачи охлаждающей жидкости в зону резания, что позволит расширить физические представления о технологических возможностях прерывистого шлифования и повысить эффективность его практического использования.

Информационные источники

1. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования / А.В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1975. – 175 с.
2. Якимов А.В. Высокопроизводительная обработка абразивно-алмазными инструментами / А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, А.А. Якимов. – К.: Техніка, 1993. – 152 с.
3. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 2. "Теплофизика резания материалов" – Одесса: ОНПУ, 2003. – 625 с.
4. Тепловые и механические процессы при резании металлов: учеб. пособие / Ф.В. Новиков, А.А. Якимов, Г.В. Новиков и др. – Одесса: ОГПУ, 1997. – 179 с.
5. Теоретические основы технологии машиностроения: учебник / А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, А.А. Якимов и др. – Одесса: ОНПУ, 2002. – 491 с.
6. 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) Якимова О.В. – Д.: ЛПРА. – 2015. – С. 38-43.
7. Новіков Ф.В. Теоретичні основи механічної обробки високоточних деталей : монографія / Ф.В. Новіков, І.О. Рябенков. – Х. : Вид. ХНЕУ, 2013. – 352 с.
8. Новіков Ф.В. Фінішна обробка деталей різанням: монографія / Ф.В. Новіков, І.О. Рябенков. – Харків: ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2016. – 270 с.

Рябенков І.О., к.т.н.

Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка

ЗАКОНОМІРНОСТІ ЗНИЖЕННЯ СИЛОВОЇ ТА ТЕПЛОВОЇ НАПРУЖЕНОСТІ ПЕРЕРИВЧАСТОГО ШЛІФУВАННЯ

В роботі теоретично обґрунтовано умови зменшення параметрів силовой та теплової напруженості переривчастого шліфування, які полягають в зменшенні енергосмності обробки в зв'язку з ударним характером взаємодії робочого виступу переривчастого круга та оброблюваного матеріалу і можливістю підтримки його високої ріжучої здатності за рахунок здійснення високопродуктивної правки переривчастого круга в процесі обробки, а також у зменшенні часу взаємодії робочого виступу переривчастого круга з оброблюваним матеріалом. Показано, що при переривчастому шліфуванні можна суттєво зменшити інтенсивність тертя зв'язки круга з оброблюваним матеріалом, що є основним осередком силовой та теплової напруженості процесу шліфування. На цій основі розкрито закономірності формування тангенціальної складової сили різання й температури різання при переривчастому шліфуванні. Доведено, що існує оптимальне значення часу контакту робочого виступу переривчастого круга з оброблюваним матеріалом, яке забезпечує досягнення мінімальної температури різання, і яке може бути використане для розрахунку оптимальної кількості робочих виступів і западин на робочій поверхні переривчастого круга, їх протяжності та, відповідно, основних технико-економічних показників переривчастого шліфування.

Ключові слова: *переривчасте шліфування, сила різання, температура різання, енергоємність обробки, тертя зв'язки круга з матеріалом, робочий виступ круга, правка круга.*

I. Ryabenkov

Kharkov National Technical University of Agriculture named after Petr Vasilenko

**REGULARITIES OF REDUCTION OF POWER AND THERMAL STRESS OF
INTERROGEN GRINDING**

The conditions for reducing the parameters of the power and thermal tension of intermittent grinding are theoretically justified, consisting in reducing the energy intensity of the treatment due to the impact character of the interaction of the working protrusion of the discontinuous circle and the material being processed, and the ability to maintain its high cutting ability due to the high-performance dressing of the discontinuous circle during processing, And also in the decrease in the time of interaction of the working protrusion of the discontinuous circle with the treated mother Alom. It is shown that with intermittent grinding, it is possible to significantly reduce the friction intensity of the wheel bundle with the material being processed, which is the main focus of the power and thermal tension of the grinding process. On this basis, the regularities of the formation of the tangential component of the cutting force and cutting temperature are revealed with intermittent grinding. It is proved that there is an optimal value of the contact time of the working protrusion of the discontinuous circle with the material to be treated, which ensures the achievement of the minimum cutting temperature and which can be used to calculate the optimum number of working protrusions and valleys on the working surface of the discontinuous circle, their extent and, accordingly, the main technical and economic indicators Intermittent grinding.

Keywords: *intermittent grinding, cutting force, cutting temperature, power consumption of processing, friction of the ligament of the circle with the material, working protrusion of the circle, correction of the circle.*