

ФИЗИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ПРЕРЫВИСТОГО ШЛИФОВАНИЯ

В работе на основе аналитических зависимостей для определения тангенциальной и радиальной составляющих силы резания проведено сравнение параметров силовой напряженности процессов шлифования прерывистыми и обычными сплошными кругами. Показано, что при прерывистом шлифовании в связи с периодическим ударным характером контакта прерывистого круга с обрабатываемым материалом на его рабочей поверхности образуется развитый режущий рельеф, обеспечивающий снижение силы и температуры резания. В результате сила и температура резания с течением времени обработки остаются фактически неизменными, тогда как при обычном шлифовании они существенно увеличиваются в связи с затуплением круга, увеличивая энергоемкость обработки и ухудшая параметры качества. Установлено, что теоретически выявленные закономерности процессов прерывистого и обычного шлифования соответствуют известным экспериментальным данным. Это свидетельствует об их достоверности. Показано, что шероховатость обработки при прерывистом шлифовании больше, чем при обычном шлифовании, а уменьшить ее можно уменьшением зернистости круга и скорости детали при соответствующем увеличении глубины шлифования. Даны практические рекомендации по повышению эффективности применения прерывистого шлифования.

Ключевые слова: прерывистое шлифование, сила резания, температура резания, энергоемкость обработки, качество обработки, шероховатость поверхности, рабочий выступ круга.

Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важнейшими научными и практическими задачами. Важнейшим условием повышения качества и производительности при шлифовании деталей, изготовленных из труднообрабатываемых материалов, следует рассматривать прерывистое шлифование. Большой вклад в развитие этого прогрессивного метода шлифования внес выдающийся ученый-технолог, профессор Якимов А. В., который разработал научно-практические основы метода прерывистого шлифования и осуществил его широкое внедрение на промышленных предприятиях. В 1986 году коллективу ученых под руководством профессора Якимова А. В. присуждена Государственная премия Украины за разработки в области создания и промышленного применения технологий прерывистого шлифования. В настоящее время проводятся дальнейшие работы по исследованию и внедрению в производство технологий прерывистого шлифования, в особенности с применением алмазных прерывистых кругов. Поэтому постоянно возникают и новые задачи, связанные с разработкой более эффективных технологических процессов прерывистого шлифования и определением оптимальных условий обработки, обеспечивающих высокие показатели качества, точности и производительности. В связи с этим, в настоящей работе приведены результаты исследований процесса прерывистого шлифования, выполненные в соответствии с тематическим планом научно-практических работ Харьковского национального технического университета сельского хозяйства имени Петра Василенко.

Анализ последних достижений и публикаций. В работах профессора Якимова А. В. [1–5] приведено большое количество экспериментальных данных, касающихся исследования основных технологических показателей прерывистого шлифования: силы и температуры резания, параметров качества и производительности обработки и т.д. На основе этих данных обоснованы преимущества прерывистого шлифования и разработаны практические рекомендации по повышению эффективности процесса шлифования за счет перехода от обычного шлифования сплошными кругами к шлифованию прерывистыми кругами. Приведенные результаты экспериментальных исследований открывают новые технологические возможности осуществления высокоэффективного шлифования прерывистыми кругами. Однако для их практического использования требуется разработка и применение новых методических подходов к определению оптимальных условий прерывистого шлифования. Поэтому настоящая работа посвящена дальнейшему исследованию условий уменьшения снижения силовой и тепловой напряженности прерывистого шлифования, повышения качества и производительности обработки. В основу работы положены результаты теоретических и

экспериментальных исследований, приведенные в работах [1; 5–7].

Цель работы – обоснование условий снижения силы и температуры резания и повышения качества и производительности обработки при прерывистом шлифовании.

Материалы исследований. В общем виде тангенциальная P_z и радиальная P_y составляющие силы резания, а также условное напряжение резание $\sigma = P_z / S_{мгн}$ (энергоёмкость обработки) при шлифовании аналитически описываются следующими зависимостями [7]:

$$P_z = \frac{2 \cdot \sigma_{сжс}}{K_{ш}} \cdot S_{мгн}; \quad (1)$$

$$P_y = \frac{2 \cdot \sigma_{сжс}}{K_{ш}^2} \cdot S_{мгн}; \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{2 \cdot \sigma_{сжс}}{K_{ш}}, \quad (3)$$

где $\sigma_{сжс}$ – предел прочности на сжатие обрабатываемого материала, Н/м²; $K_{ш} = P_z / P_y = tg2\beta = ctg(\gamma + \psi)$ – коэффициент шлифования; β – условный угол сдвига обрабатываемого материала, Н/м²; γ – отрицательный передний угол режущего зерна; ψ – условный угол трения режущего зерна с обрабатываемым материалом ($tg\psi = f$ – коэффициент трения); $S_{мгн} = Q / V_{кр}$ – мгновенная суммарная площадь поперечного сечения среза всеми одновременно работающими зёрнами круга, м²; $Q = B \cdot V_{дет} \cdot t$ – производительность обработки, м³/с; B – ширина шлифования, м; $V_{дет}$, $V_{кр}$ – скорости детали и круга, м/с; t – глубина шлифования, м.

Как видно, параметры силовой напряженности процесса шлифования P_z , P_y и σ однозначно определяются коэффициентом шлифования $K_{ш}$, который при шлифовании всегда меньше единицы. Чем больше $K_{ш}$, тем больше P_z , P_y и σ . Радиальная составляющая силы резания P_y больше зависит от $K_{ш}$, т.е. принимает большие значения, чем тангенциальная P_z составляющая силы резания. С увеличением углов γ и ψ коэффициент шлифования $K_{ш}$ увеличивается, что интенсифицирует силовую напряженность процесса шлифования, т.е. приводит к увеличению параметров P_z , P_y и σ . Поэтому с целью уменьшения этих параметров следует уменьшать углы γ и ψ за счет обеспечения работы шлифовального круга в режиме самозатачивания или применения непрерывной (периодической) правки круга, а также применения эффективных технологических сред, снижающих интенсивность трения в зоне шлифования.

При прерывистом шлифовании в связи с периодическим ударным характером взаимодействия прерывистого круга с обрабатываемым материалом происходит самообразование профиля рабочей поверхности круга, образование и поддержание развитого режущего рельефа круга, работающего, по сути, в режиме интенсивного самозатачивания [1; 2]. Затупившиеся режущие зёрна своевременно выпадают из связки круга, а в работу подключаются новые неизношенные зёрна. Это обеспечивает постоянное поддержание высокой режущей способности прерывистого круга, повышение производительности и качества обработки (исключение образования на обрабатываемых поверхностях прижогов, микротрещин и других температурных дефектов). В связи с увеличенным выступанием режущих зёрен над уровнем связки круга существенно снижается интенсивность трения связки круга с обрабатываемым материалом, тогда как при обычном шлифовании сплошным кругом доля энергии трения в общем энергетическом балансе шлифования является определяющей [1]. Такой режим работы зёрен способствует уменьшению угла γ и, соответственно, уменьшению параметров P_z , P_y и σ , особенно радиальной P_y составляющей силы резания, которая квадратичной зависимостью связана с коэффициентом шлифования $K_{ш}$.

Поэтому при прерывистом шлифовании с увеличением толщины среза и соответственно P_y коэффициент шлифования $K_{ш}$ будет оставаться фактически постоянным в связи с

ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

постоянным значением угла γ , тогда как при обычном шлифовании в связи с затуплением зерен и образованием на них площадок износа угол γ будет уменьшаться от 90° до определенного (установившегося) значения, вызывая первоначально увеличение $K_{ш}$, а затем его примерное постоянство. Следовательно, достижение установившегося значения $K_{ш}$ при обычном шлифовании возможно при увеличенных значениях P_y , что согласуется с аналогичными экспериментальными данными, установленными профессором Сагардой А. А. [8]. Таким образом, теоретически показана возможность уменьшения параметров силовой напряженности процесса шлифования P_z , P_y и σ в условиях прерывистого шлифования, что согласуется с известными экспериментальными данными (рис. 1 [1]). Как следует из рис. 1, с течением времени обработки тангенциальная P_z и радиальная P_y составляющие силы резания при обычном шлифовании увеличиваются, а при прерывистом шлифовании остаются фактически постоянными в связи с высокой режущей способностью прерывистого круга, обусловленной его ударным характером взаимодействия с обрабатываемым материалом и обеспечением работы круга в режиме самозатачивания, о чем свидетельствуют повышенные значения коэффициента шлифования $K_{ш} = P_z / P_y$.

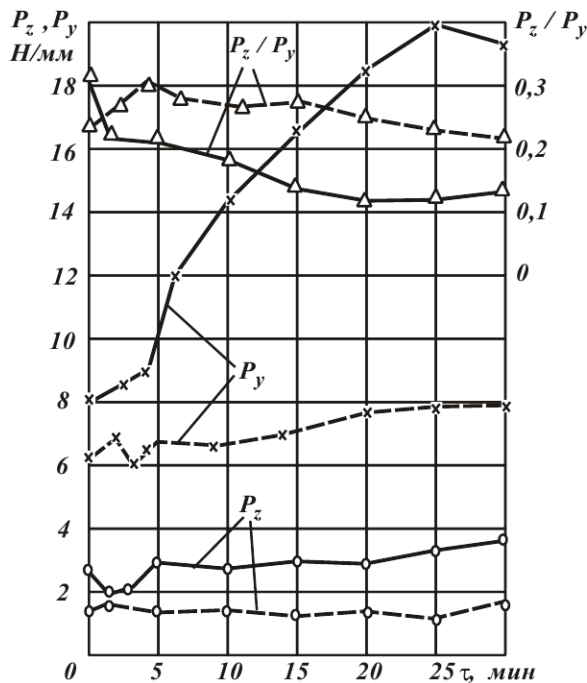


Рис. 1 – Зависимости тангенциальной и радиальной составляющих силы резания P_z , P_y и отношения P_z / P_y от времени работы круга ($V_{кр} = 35$ м/с; $V_{дет} = 10$ м/мин; контурные линии – сплошной круг; штриховые – прерывистый круг)

Исходя из зависимостей (1) и (2), уменьшить P_z и P_y можно также путем уменьшения производительности обработки Q и увеличения скорости круга $V_{кр}$.

Из зависимости (1) можно установить связь между составляющими силы резания P_z и P_y :

$$P_z = \sqrt{2 \cdot \sigma_{сжс} \cdot S_{мгн} \cdot P_y} \quad (4)$$

С физической точки зрения произведение параметров $\sigma_{сжс} \cdot S_{мгн} = P_{z0}$ представляет собой силу, при достижении которой возможно разрушение прямолинейного бруса (площадью поперечного сечения $S_{мгн}$) при его сжатии, тогда

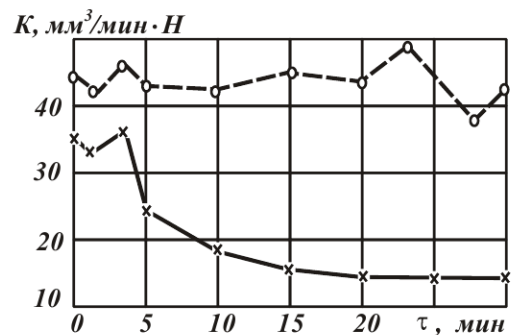


Рис. 2 – Зависимость удельного сьема металла K от времени шлифования деталей из стали X12M (абразивный круг – Э9А25СМ2К; $V_{кр} = 25$ м/с; $V_{дет} = 10$ м/мин; контурные линии – сплошной круг; штриховые – прерывистый круг)

$$P_z = \sqrt{2 \cdot P_{z0} \cdot P_y} \quad (5)$$

Как видно, тангенциальная P_z составляющая силы резания всегда больше силы P_{z0} , так как $P_{z0} < P_y$, т.е. процесс стружкообразования при резании характеризуется большей силовой напряженностью по сравнению с процессом разрушения прямолинейного бруса в условиях его сжатия. Из зависимости (5) следует, что тангенциальная P_z составляющая силы резания изменяется менее интенсивно, чем радиальная P_y составляющая силы резания, о чем свидетельствуют экспериментальные данные (рис. 1), полученные в особенности при обычном шлифовании. При прерывистом шлифовании также наблюдается более интенсивный рост P_y по сравнению с P_z (с течением времени обработки), однако с меньшей интенсивностью, чем при обычном шлифовании сплошным кругом.

Из зависимости (2) можно определить удельный съем металла

$$K = \frac{Q}{P_y} = \frac{K_{ш}^2 \cdot V_{кр}}{2 \cdot \sigma_{сжс}} \quad (6)$$

который тем больше, чем больше коэффициент шлифования $K_{ш}$ и скорость круга $V_{кр}$. Поэтому при прерывистом шлифовании удельный съем металла K всегда больше, чем при обычном шлифовании в связи с увеличенным значением коэффициента шлифования $K_{ш}$, что подтверждается экспериментальными данными (рис. 2 [1]). Как следует из рис. 2, при прерывистом шлифовании удельный съем металла K остается фактически постоянным с течением времени обработки (т.е. постоянно обеспечивается высокая режущая способность круга и, соответственно, высокая производительность обработки), а при обычном шлифовании удельный съем металла K непрерывно уменьшается в связи с уменьшением коэффициента шлифования $K_{ш}$, что снижает эффективность обработки (т.е. уменьшается производительность обработки и увеличивается сила резания).

Таким образом, приведенные аналитические зависимости вполне адекватно описывают параметры силовой напряженности процессов прерывистого и обычного шлифования и позволяют производить теоретический анализ закономерностей их функционирования, что открывает новые технологические возможности интенсификации процесса шлифования.

Как известно [1; 2], температура резания при прерывистом шлифовании меньше, чем при обычном шлифовании. Это связано, во-первых, с прерывистостью контакта круга с обрабатываемым материалом и возможностью периодического (хотя и весьма кратковременного) охлаждения обрабатываемой поверхности в момент прохождения впадины прерывистого круга. Во-вторых, с уменьшением силы резания и соответственно условного напряжения резания σ (энергоемкости обработки), которое прямо пропорционально связано с температурой резания. Причем, уменьшение условного напряжения резания, пожалуй, в большей мере влияет на уменьшение температуры резания, чем прерывистость контакта и периодическое кратковременное охлаждение обрабатываемой поверхности в момент прохождения впадины прерывистого круга.

Несомненно, ударный характер взаимодействия прерывистого круга с обрабатываемым материалом вызывает возникновение колебаний в технологической системе, которые отрицательно сказываются на точности и качестве обработки. Поэтому в процессе прерывистого шлифования необходимо исключить резонансное состояние технологической системы, в частности, за счет уменьшения количества рабочих выступов круга и уменьшения скорости круга с целью уменьшения частоты следования импульсов силы. Это позволит уменьшить интенсивность колебаний при шлифовании и повысить точность и качество обработки.

Очевидно, с увеличением глубины внедрения режущих зерен в обрабатываемый материал в момент контакта рабочего выступа прерывистого круга с обрабатываемым материалом будет увеличиваться шероховатость обрабатываемой поверхности. Поэтому с целью ее уменьшения необходимо уменьшать зернистость круга \bar{X} , которая оказывает наибольшее влияние на параметр шероховатости обработанной поверхности [4]:

$$R_{max} = 10 \cdot \left(\frac{\pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{дем} \cdot \rho^{0.5}}{m \cdot V_{кр}} \right)^{0.4} \quad (7)$$

ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

где m – объемная концентрация зерен в круге; $\rho = 1/R_{dem} + 1/R_{кр}$; R_{dem} , $R_{кр}$ – соответственно радиусы детали и круга, м.

Как следует из зависимости (7), для уменьшения параметра шероховатости поверхности R_{max} целесообразно также уменьшать скорость детали V_{dem} , а для поддержания производительности обработки на заданном уровне – увеличивать глубину шлифования t , которая не входит в зависимость (7), т.е. переходить в область высокопроизводительного глубинного шлифования. Этим подтверждается эффективность применения на практике при шлифовании труднообрабатываемых материалов алмазных прерывистых кругов при обработке пазов, канавок, профильном шлифовании, разрезке материалов и т.д.

Выводы. На основе аналитических зависимостей для определения тангенциальной и радиальной составляющих силы резания проведено сравнение параметров силовой напряженности процессов шлифования прерывистыми и обычными сплошными кругами. Показано, что при прерывистом шлифовании в связи с периодическим ударным характером контакта прерывистого круга с обрабатываемым материалом на его рабочей поверхности образуется развитый режущий рельеф, обеспечивающий снижение силы и температуры резания. В результате сила и температура резания с течением времени обработки остаются фактически неизменными, тогда как при обычном шлифовании они существенно увеличиваются в связи с затуплением круга, увеличивая энергоемкость обработки и ухудшая параметры качества. Установлено, что теоретически выявленные закономерности процессов прерывистого и обычного шлифования соответствуют известным экспериментальным данным. Это свидетельствует об их достоверности. Показано, что шероховатость обработки при прерывистом шлифовании больше, чем при обычном шлифовании, а уменьшить ее можно уменьшением зернистости круга и скорости детали при соответствующем увеличении глубины шлифования. На основе полученных результатов исследований разработаны практические рекомендации по повышению эффективности применения прерывистого шлифования.

Перспективы дальнейшей работы в данном направлении. В последующих работах следует оценить технологические возможности уменьшения шероховатости обработанной поверхности и температуры резания при прерывистом шлифовании за счет перехода в область глубинного шлифования, реализуя при этом относительно небольшую скорость детали при заданной производительности обработки. Важно также определить возможности повышения производительности обработки при глубинном шлифовании.

Информационные источники

1. Якимов А. В. Оптимизация процесса шлифования / А. В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1975. – 175 с.
2. Якимов А. В. Прерывистое шлифование / А. В. Якимов. – Киев–Одесса: Издательское объединение “Вища школа”, 1986. – 175 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. Новіков Ф. В. Теоретичні основи механічної обробки високоточних деталей : монографія / Ф. В. Новіков, І. О. Рябенков. – Х. : Вид. ХНЕУ, 2013. – 352 с.
7. Новіков Ф. В. Фінішна обробка деталей різанням: монографія / Ф. В. Новіков, І. О. Рябенков. – Харків: ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2016. – 270 с.
8. Синтетические алмазы в машиностроении / Под ред. В.Н. Бакуля. – К.: Наук. думка, 1976. – 351 с.

Рябенков І.О., к.т.н.

Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка

ФІЗИЧНІ ЕФЕКТИ ПЕРЕРИВЧАСТОГО ШЛІФУВАННЯ

У роботі на основі аналітичних залежностей для визначення тангенціальної та радіальної складових сили різання проведено порівняння параметрів силової напруженості процесів шліфування переривчастими та звичайними суцільними кругами. Показано, що при

ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

переривчастому шліфуванні в зв'язку з періодичним ударним характером контакту переривчастого круга з оброблюваним матеріалом на його робочій поверхні утворюється розвинений ріжучий рельєф, що забезпечує зниження сили й температури різання. В результаті сила й температура різання з часом обробки залишаються фактично незмінними, тоді як при звичайному шліфуванні вони суттєво збільшуються в зв'язку з затупленням круга, збільшуючи енергоємність обробки й знижуючи параметри якості. Встановлено, що теоретично встановлені закономірності процесів переривчастого й звичайного шліфування відповідають відомим експериментальним даним. Це свідчить про їх достовірність. Показано, що шорсткість обробки при переривчастому шліфуванні більше, ніж при звичайному шліфуванні, а зменшити її можна зменшенням зернистості круга й швидкості деталі при відповідному збільшенні глибини шліфування. Надано практичні рекомендації відносно підвищення ефективності застосування переривчастого шліфування.

Ключові слова: *переривчасте шліфування, сила різання, температура різання, енергоємність обробки, якість обробки, шорсткість поверхні, робочий виступ круга.*

I. Ryabenkov

Kharkov National Technical University of Agriculture named after Petr Vasilenko

PHYSICAL EFFECTS OF INTERRUPTED GRINDING

In work on the basis of analytical dependences for determination of the tangential and radial components of the cutting force, the parameters of the strength of the grinding processes are compared by discontinuous and usual continuous circles. It is shown that in the case of discontinuous grinding in connection with the periodic impact character of the contact of the discontinuous circle with the material being processed, a developed cutting relief is formed on its working surface, which ensures a reduction in the force and temperature of cutting. As a result, the force and cutting temperature with the course of the treatment time remain virtually unchanged, whereas in conventional grinding they substantially increase due to blunt circle, increasing energy intensity of processing and quality parameters. It is established that the theoretically revealed regularities of the processes of intermittent and ordinary grinding correspond to known experimental data. This indicates their reliability. It is shown that the roughness of the machining with intermittent grinding is greater than in conventional grinding, and it can be reduced by reducing the grain size of the wheel and the speed of the part with a corresponding increase in the grinding depth. Practical recommendations for increasing the effectiveness of the use of intermittent grinding are given.

Keywords: *intermittent grinding, cutting force, cutting temperature, processing energy, processing quality, surface roughness, working circle protrusion.*