

УДК 621.923

И.А. Рябенков, канд. техн. наук, Харьков,
Гершиков И.В., Бердянск Украина

УСЛОВИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ШЛИФОВАНИЯ С ДИСКРЕТНОЙ РАДИАЛЬНОЙ ПОДАЧЕЙ

Отримано аналітичні залежності для визначення технологічних параметрів процесу шліфування за жорсткою і пружною схемами, що дозволяють науково обґрунтовано підходити до вибору раціональних умов обробки. Показано, що при шліфуванні за жорсткою схемою сила та температура різання збільшуються з плином часу обробки (у зв'язку з тертям зв'язки круга з оброблюваним матеріалом), а при шліфуванні за пружною схемою – залишаються постійними з плином часу обробки. Це вказує на ефективність застосування даної схеми шліфування.

Получены аналитические зависимости для определения технологических параметров процесса шлифования по жесткой и упругой схемам, позволяющие научно обоснованно подходить к выбору рациональных условий обработки. Показано, что при шлифовании по жесткой схеме сила и температура резания увеличиваются с течением времени обработки (в связи с трением связки круга с обрабатываемым материалом), а при шлифовании по упругой схеме – остаются постоянными с течением времени обработки. Это указывает на эффективность применения данной схемы шлифования.

Analytical dependences for determination of technological parameters of grinding process on elastic and non-elastic schemes, that allow scientifically valid approach to the rational choice of processing conditions, are obtained. It is shown that in case of grinding on non-elastic scheme, the force and cutting temperature increase with time of processing (because of friction of wheel bonding with material-to be-processed), and in case of grinding on elastic scheme, the force and cutting temperature remain constant with time of processing. This indicates the effectiveness of given scheme of grinding.

Введение. При изготовлении высокоточных деталей на финишных операциях широко применяются методы обработки свободным абразивом, которые обеспечивают высокие показатели точности и шероховатости поверхности. Однако, при этом имеет место шаржирование абразивных зерен в обрабатываемую поверхность, что снижает эффективность обработки. Поэтому целесообразно применять на финишных операциях процессы шлифования и лезвийной обработки с обеспечением таких же показателей точности и шероховатости, как и при обработке свободным абразивом. В связи с этим актуальны вопросы проведения дальнейших исследований по определению технологических возможностей процесса шлифования.

Анализ последних достижений и литературы. Процессам шлифования в научно-технической литературе уделено большое внимание [1, 2]. Разработаны теоретические основы абразивного и алмазного шлифования [3, 4]. Вместе с тем, отсутствуют аналитические зависимости, с единых позиций

описывающие параметры силовой и тепловой напряженности процессов шлифования по жесткой и упругой схемам. Это не позволяет в полной мере выявить, обосновать и реализовать технологические возможности этих схем шлифования.

Цель работы, постановка проблемы. Целью работы является теоретическое обоснование условий повышения эффективности процесса шлифования с дискретной радиальной подачей на основе анализа закономерностей изменения упругих перемещений, возникающих в технологической системе. Работа направлена на дальнейшее развитие математической модели определения параметров силовой и тепловой напряженности процесса шлифования с учетом процессов резания и трения связки круга с обрабатываемым материалом.

Материалы исследований. При шлифовании прямолинейной детали по жесткой схеме с дискретной радиальной подачей (рис.) детали сообщаются возвратно-поступательные перемещения со скоростью $V_{\text{дем}}$ (положения I и II на рис. 1).

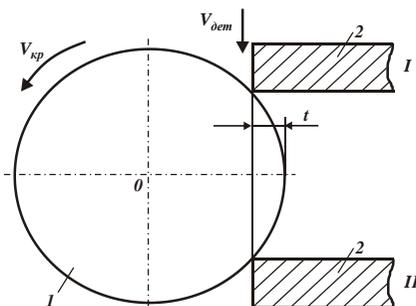


Рисунок – Расчетная схема процесса шлифования:
1 – круг; 2 – деталь

На первом проходе фактическая глубина шлифования $t_{\phi 1}$ всегда меньше номинальной глубины шлифования t вследствие трения связки круга с обрабатываемым материалом и возникновения в технологической системе упругого перемещения y_1 , т.е. $t_{\phi 1} = t - y_1$. В результате с каждым последующим проходом n обрабатываемой детали параметры t_{ϕ} и y будут пропорционально увеличиваться: $t_{\phi} = n \cdot t_{\phi 1}$; $y = n \cdot y_1$. Тогда радиальная $P_{y_{mp}}$ и тангенциальная $P_{z_{mp}} = f_1 \cdot P_{y_{mp}}$ составляющие силы резания, обусловленные трением связки круга с обрабатываемым материалом, опишутся [5]:

$P_{y_{mp}} = c \cdot y = c \cdot n \cdot y_1$; $P_{z_{mp}} = f_1 \cdot c \cdot n \cdot y_1$, где c – жесткость технологической системы, Н/м; f_1 – коэффициент трения связки круга с обрабатываемым материалом.

С увеличением n составляющие силы резания $P_{z_{mp}}$ и $P_{y_{mp}}$ будут пропорционально увеличиваться, принимая в конечном итоге достаточно большие значения. Это приведет к снижению качества и точности обрабатываемых поверхностей.

Тангенциальная $P_{z_{pez}}$ и радиальная $P_{y_{pez}}$ составляющие силы резания, обусловленные процессом “чистого” резания, определяются [6]: $P_{z_{pez}} = \sigma \cdot Q / V_{kp}$; $P_{y_{pez}} = P_{z_{pez}} / K_{u_{pez}}$, где σ – условное напряжение резания, Н/м²; $Q = B \cdot V_{dem} \cdot t_{\phi 1}$ – фактическая производительность обработки, м³/с; V_{dem} , V_{kp} – скорости детали и круга, м/с; B – ширина шлифования, м. Тогда суммарные тангенциальная P_z и радиальная P_y составляющие силы резания, а также коэффициент шлифования K_{u_i} опишутся:

$$P_z = \frac{\sigma \cdot B \cdot V_{dem} \cdot t_{\phi 1}}{V_{kp}} + f_1 \cdot c \cdot n \cdot y_1; \quad (1)$$

$$P_y = \frac{\sigma \cdot B \cdot V_{dem} \cdot t_{\phi 1}}{K_{pez} \cdot V_{kp}} + c \cdot n \cdot y_1; \quad (2)$$

$$K_{u_i} = \frac{P_z}{P_y} = \frac{\frac{\sigma \cdot B \cdot V_{dem} \cdot t_{\phi 1}}{V_{kp}} + f_1 \cdot c \cdot n \cdot y_1}{\frac{\sigma \cdot B \cdot V_{dem} \cdot t_{\phi 1}}{K_{pez} \cdot V_{kp}} + c \cdot n \cdot y_1}. \quad (3)$$

Очевидно, с увеличением количества проходов n коэффициент шлифования K_{u_i} уменьшается, что, как известно, снижает эффективность обработки. Поэтому основным условием снижения параметров силовой напряженности процесса шлифования в данном случае является исключение трения связки круга с обрабатываемым материалом за счет повышения режущей способности круга. Однако выполнить это условие удается не всегда. Поэтому на практике принято для заданной номинальной глубины шлифования осуществлять еще и второй (обратный) ход обрабатываемой детали или круга, т.е. производить съем материала на заданную глубину шлифования за двойной ход. В результате при обратном ходе должен происходить съем всего подаваемого в зону шлифования обрабатываемого материала и выполняться условие $t_{\phi 1} \rightarrow t$, т.е. должно устраняться упругое

перемещение, возникающее в технологической системе при прямом ходе. При правильно выбранном режиме шлифования данное условие, как правило, выполняется. Вместе с тем, при низкой жесткости технологической системы возникающее упругое перемещение значительно и устранить его при обратном ходе весьма сложно. В итоге с течением времени обработки происходит накопление неснятого материала, что приводит к увеличению упругого перемещения, возникающего в технологической системе и необходимости периодически прекращать процесс шлифования. Естественно, добиться требуемой точности обработки в этих условиях не представляется возможным, а процесс шлифования происходит с относительно низкой производительностью и высокой трудоемкостью обработки. В связи с этим, для выполнения условия $t_{\phi 1} \rightarrow t$ необходимо увеличить количество выхаживающих (прямых и обратных) проходов обрабатываемой детали или шлифовального круга. Заслуживает внимания анализ энергоёмкости шлифования \mathcal{E} . С учетом соотношений $y_1 = t - t_{\phi 1}$ и $Q = B \cdot V_{dem} \cdot t_{\phi 1}$:

$$\mathcal{E} = \frac{P_z \cdot V_{kp}}{Q} = \sigma + \frac{f_1 \cdot c \cdot n \cdot V_{kp}}{B \cdot V_{dem}} \cdot \left(\frac{t}{t_{\phi 1}} - 1 \right). \quad (4)$$

Второе слагаемое зависимости (4) определяется главным образом множителем $(t/t_{\phi 1} - 1)$, который при условии $t_{\phi 1} \rightarrow t$ равен нулю. Следовательно, при отсутствии трения связки круга с обрабатываемым материалом, т.е. когда второе слагаемое зависимости (4) равно нулю, энергоёмкость обработки \mathcal{E} равна условному напряжению резания σ , определяемому условиями процесса “чистого” резания. С увеличением отношения $t/t_{\phi 1}$ энергоёмкость обработки \mathcal{E} увеличивается, что вызывает повышение силовой и тепловой напряженности процесса шлифования и указывает на необходимость выполнения условия $t_{\phi 1} \rightarrow t$.

Важно провести анализ температуры резания при шлифовании θ на основе известной зависимости [6]:

$$\theta = \frac{q \cdot l_2}{\lambda} = \frac{P_z \cdot V_{kp} \cdot l_2}{\lambda \cdot F} = \left(\frac{\sigma \cdot B \cdot V_{dem} \cdot t_{\phi 1}}{F} + \frac{f_1 \cdot c \cdot n \cdot (t - t_{\phi 1}) \cdot V_{kp}}{F} \right) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \tau}{c_m \cdot \rho \cdot \lambda}}, \quad (5)$$

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

материала, кг/м^3 ; F – площадь контакта круга с обрабатываемым материалом, м^2 ; τ – время контакта круга с обрабатываемой деталью, с.

Исходя из зависимости (5), основным условием уменьшения температуры резания при шлифовании θ является уменьшение или даже исключение второго слагаемого, обусловленного трением связки круга с обрабатываемым материалом, что достигается выполнением условия $t_{\phi 1} \rightarrow t$. Увеличение первого слагаемого зависимости в связи с увеличением $t_{\phi 1}$ следует компенсировать уменьшением времени τ контакта круга с обрабатываемой деталью. Наиболее эффективным путем уменьшения τ следует рассматривать периодическое прерывание процесса шлифования за счет применения круга с прерывистой рабочей поверхностью, т.е. применения прерывистого шлифования.

В условиях круглого и плоского шлифования время τ следует рассматривать как время контакта круга с элементарным адиабатическим стержнем, набором которых представлен снимаемый припуск [3]. Исходя из такого представления процесса шлифования, согласно зависимости (5), уменьшить температуру резания при шлифовании θ можно также за счет увеличения площади контакта круга с обрабатываемым материалом F (при фиксированной производительности обработки Q), что достигается применением глубинного (однопроходного) шлифования. Увеличение времени τ контакта круга с элементарным адиабатическим стержнем в связи с уменьшением скорости детали V_{dem} в этом случае может быть не столь значительно по сравнению с увеличением площади контакта круга с обрабатываемым материалом F . В результате температура резания при шлифовании θ может уменьшиться. Это согласуется с практическим опытом применения метода глубинного шлифования, обеспечивающего, как правило, достижения двойного эффекта – повышения производительности и качества обработки.

Однако, как показывает практика круглого и плоского шлифования, наиболее эффективным путем уменьшения температуры резания при шлифовании θ следует рассматривать применение многопроходного шлифования, характеризующегося увеличенными значениями скорости детали V_{dem} . Здесь эффект обработки достигается за счет уменьшения времени τ контакта круга с элементарным адиабатическим стержнем.

Рассмотрим процесс плоского многопроходного шлифования по жесткой схеме для случая, когда отсутствует трение связки круга с обрабатываемым материалом. Тогда тангенциальная составляющая силы резания опишется зависимостью $P_z = P_{z_{рез}}$. С учетом соотношений $P_z = K_{рез} \cdot P_y$;

$P_y = c \cdot y = c \cdot (t \cdot n - t_\phi \cdot n)$ эта зависимость принимает вид уравнения

$K_{рез} \cdot c \cdot (t \cdot n - t_\phi \cdot n) = \sigma \cdot \frac{B \cdot V_{дем} \cdot t_\phi}{V_{кр}}$, разрешая которое относительно

неизвестной величины t_ϕ , получено:

$$t_\phi = \frac{t}{\left(1 + \frac{\sigma \cdot B \cdot V_{дем}}{K_{рез} \cdot c \cdot V_{кр} \cdot n}\right)}. \quad (6)$$

С увеличением n фактическая глубина шлифования t_ϕ непрерывно увеличивается, асимптотически приближаясь к номинальной глубине шлифования t . По такому же закону будет изменяться и производительность обработки. Величина y определится зависимостью:

$$y = (t \cdot n - t_\phi \cdot n) = \frac{t \cdot n}{\left(1 + \frac{K_{рез} \cdot c \cdot V_{кр} \cdot n}{\sigma \cdot B \cdot V_{дем}}\right)}. \quad (7)$$

Из зависимости (7) следует, что при $n=0$ величина упругого перемещения $y=0$, а при $n \rightarrow \infty$, вследствие преобладания в знаменателе зависимости (7) второго слагаемого, величина y определится:

$$y = y_{уст} = \frac{\sigma \cdot B \cdot V_{дем} \cdot t}{K_{рез} \cdot c \cdot V_{кр}} = \frac{\sigma \cdot Q_0}{K_{рез} \cdot c \cdot V_{кр}} = \frac{P_{y_{уст}}}{c}, \quad (8)$$

где $y_{уст}$, $P_{y_{уст}} = \frac{\sigma \cdot Q_0}{K_{рез} \cdot V_{кр}}$ – установившиеся значения величины упругого перемещения y и радиальной составляющей силы резания P_y .

Зависимость (7) с учетом (8) можно представить в виде:

$$y = \frac{1}{\left(\frac{1}{n \cdot t} + \frac{1}{y_{уст}}\right)} = \frac{y_{уст}}{\left(1 + \frac{y_{уст}}{n \cdot t}\right)}. \quad (9)$$

Как видно, при $n=0$ величина упругого перемещения $y=0$, а при $n \rightarrow \infty$ соответственно $y \rightarrow y_{уст}$. По такому же закону будет изменяться и радиальная $P_y = c \cdot y$ составляющая силы резания.

При шлифовании с фиксированным радиальным усилием P_y коэффициент шлифования $K_{ш}$ выражается:

$$K_{ш} = \frac{P_z}{P_y} = \left(K_{у_{рез}} - f_1\right) \cdot \frac{P_{y_{рез}}}{P_y} + f_1. \quad (10)$$

В отличие от аналогичной зависимости (3), полученной при шлифовании по жесткой схеме, зависимость (10) не содержит время τ . Следовательно, тангенциальная составляющая силы резания P_z не увеличивается с течением времени τ , что не приводит к повышению силовой и тепловой напряженности процесса шлифования. Это чрезвычайно важно с точки зрения обеспечения точности и качества обрабатываемых поверхностей. Иными словами, применение упругой схемы шлифования в отличие от жесткой схемы шлифования позволяет управлять процессом, исключая отрицательное влияние продолжительности обработки τ на технологические показатели шлифования. Собственно этим и объясняется эффективность применения на практике данной схемы шлифования.

Выводы. Получены аналитические зависимости для определения параметров шлифования по жесткой и упругой схемам, позволяющие обоснованно подходить к выбору рациональных условий обработки. Показано, что при шлифовании по жесткой схеме сила и температура резания увеличиваются с течением времени обработки (в связи с трением связки круга с обрабатываемым материалом), а при шлифовании по упругой схеме – остаются постоянными с течением времени обработки. Это указывает на эффективность применения данной схемы шлифования.

Список использованных источников: 1. *Маслов Е.Н.* Теория шлифования металлов / Е.Н. Маслов. – М.: Машиностроение, 1974. – 319 с. 2. *Лурье Г.Б.* Шлифование металлов / Г.Б. Лурье. – М.: Машиностроение, 1969. – 197 с. 3. *Якимов А.В.* Оптимизация процесса шлифования / А.В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1975. – 175 с. 4. Робочі процеси високих технологій в машинобудуванні: навч. посібник / За редакцією А.І. Грабченко – Харків: ХДПУ, 1999. – 436 с. 5. *Новиков Г.В.* Аналитическая оценка энергоемкости обработки при шлифовании / Г.В. Новиков, В.А. Андилахай, О.С. Кленов // Високі технології в машинобудуванні: Збірник наукових праць НТУ"ХП". – Харків, 2009. – Вип. 1(18). – С. 151-156. 6. *Рябенков І.О.* Підвищення ефективності фінішної обробки деталей гідроапаратури на основі вибору раціональної структури і параметрів операцій: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.02.08 "Технологія машинобудування" / І.О. Рябенков. – Одеса, 2009. – 21 с.

Bibliography (transliterated): 1. *Maslov E.N.* Teoriya shlifovaniya metallov / E.N. Maslov. – M.: Mashinostroenie, 1974. – 319 s. 2. *Lure G.B.* Shlifovanie metallov / G.B. Lure. – M.: Mashinostroenie, 1969. – 197 s. 3. *Yakimov A.V.* Optimizatsiya protsessa shlifovaniya / A.V. Yakimov. – M.: Mashinostroenie, 1975. – 175 s. 4. Robochi protsesy vysokikh tekhnologiy v mashynobuduvanni: navch. posibnyk / Za redaktsieyu A.I. Grabchenko – Kharkiv: KhDPU, 1999. – 436 s. 5. *Novikov G.V.* Analiticheskaya otsenka energoemkosti obrabotki pri shlifovanii / G.V. Novikov, V.A. Andilakhay, O.S. Klenov // Vysoki tekhnologii v mashynobuduvanni: Zbirnyk naukovykh prats NTU "KhPP". – Kharkiv, 2009. – Vyp. 1 (18). – S. 151-156. 6. *Ryabenkov I.O.* Pidvyshennia efektyvnosti finishnoi obrobky detalei gidroaparatury na osnovi vyboru ratsionalnoi struktury i parametriv operatsiy: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk: spets. 05.02.08 "Tekhnologiya mashynobuduvannya" / I.O. Ryabenkov. – Odesa, 2009. – 21 s.

Поступила в редколлегию 23.10.2014