

**И.А. РЯБЕНКОВ**, канд. техн. наук, ГП ХМЗ «ФЭД», Харьков

## **УСЛОВИЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ И КАЧЕСТВА ОБРАБАТЫВАЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ ШЛИФОВАНИИ С ФИКСИРОВАННЫМ РАДИАЛЬНЫМ УСИЛИЕМ**

Разработана математическая модель процесса шлифования с фиксированным радиальным усилием и на ее основе определены условия повышения точности и качества обрабатываемых поверхностей. Теоретически установлено, что в отличие от шлифования по жесткой схеме, при шлифовании с фиксированным радиальным усилием время обработки фактически не влияет на снижение показателей точности и качества обрабатываемых поверхностей в связи с исключением трения связки круга с обрабатываемым материалом. Это является важным фактором повышения эффективности обработки высокоточных деталей. При этом температура резания увеличивается не столь значительно по сравнению с шлифованием по жесткой схеме. Это допускает достаточно продолжительный контакт круга с обрабатываемой деталью, тогда как при шлифовании по жесткой схеме с целью снижения температуры резания возможен непродолжительный контакт.

**Ключевые слова:** шлифование, составляющие силы резания, энергоемкость обработки, коэффициент трения, производительность обработки, время обработки, температура резания.

**Введение.** При осуществлении финишной абразивной обработки постоянно возникают проблемы снижения силовой напряженности и повышения точности и качества обрабатываемых поверхностей. В успешном решении этих проблем важная роль принадлежит применению прогрессивных кинематических схем шлифования, снижающих интенсивность трения связки круга с обрабатываемым материалом и обеспечивающих более полное использование режущих свойств шлифовального круга. К таким схемам следует отнести шлифование с фиксированным радиальным усилием [1], которое позволяет управлять радиальной составляющей силы резания и за счет этого обеспечивает повышение точности и качества обрабатываемых поверхностей. Поэтому обоснование условий эффективного применения данной схемы шлифования является актуальной задачей.

**Анализ последних достижений.** Изысканию технологических возможностей схемы шлифования с фиксированным радиальным усилием посвящены многочисленные исследования [2, 3]. Однако они, как правило, направлены на выбор оптимальных условий обработки на основе проведения экспериментальных исследований. Это не позволяет в полной мере раскрыть закономерности процесса шлифования и выявить его технологические возможности. В работе [4] предложен теоретический подход к анализу данного процесса шлифования, что позволило получить ряд важных теоретических решений, применяемых в машиностроительном производстве, в частности, при проектировании операций заточки твердосплавных режущих инструментов. Исходя из этого, представляется актуальным проведение дальнейших теоретических исследований по выявлению и обоснованию новых технологических возможностей рассматриваемого процесса шлифования.

**Постановка задачи.** Для определения условий повышения точности и качества обрабатываемых поверхностей при шлифовании с фиксированным радиальным усилием в работе решается задача разработки математической модели рассматриваемого процесса и выбора на ее основе рациональных технологических параметров обработки.

**Математическая модель.** При шлифовании с фиксированным радиальным усилием  $P_y$  тангенциальная составляющая силы резания  $P_z$  аналитически описывается так (рис. 1) [5]:

$$P_z = P_{z_{рез}} + P_{z_{тр}} = K_{рез} \cdot P_{y_{рез}} + f_1 \cdot P_{y_{тр}} = (K_{рез} - f_1) \cdot P_{y_{рез}} + f_1 \cdot P_y, \quad (1)$$

где  $P_{z_{рез}}$ ,  $P_{z_{тр}}$ ,  $P_{y_{рез}}$ ,  $P_{y_{тр}}$  – тангенциальные и радиальные составляющие силы резания, обусловленные процессами «чистого» резания и трения связки круга с материалом, Н;  $f_1$  – коэффициент трения связки круга с материалом;  $K_{рез} = P_{z_{рез}} / P_{y_{рез}} = ctg(\psi + \gamma)$ ;  $\psi$  – условный угол трения зерна с материалом;  $\gamma$  – условный (отрицательный) передний угол режущего зерна.

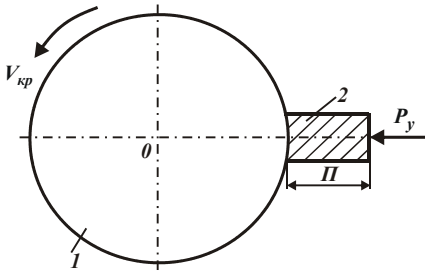


Рис. 1 – Схема шлифования с фиксированным радиальным усилием  $P_y$ : 1 – круг; 2 – деталь.

Соответственно коэффициент шлифования  $K_{ш}$  выразится формулой:

$$K_{ш} = \frac{P_z}{P_y} = (K_{рез} - f_1) \cdot \frac{P_{y_{рез}}}{P_y} + f_1. \quad (2)$$

В отличие от аналогичных зависимостей, приведенных в работе [5] применительно к процессу шлифования с фиксированной скоростью радиальной подачи (то есть при шлифовании по жесткой схеме), зависимости (1) и (2) не содержат время обработки  $\tau$ .

Следовательно, тангенциальная составляющая силы резания  $P_z$  не увеличивается с течением времени обработки  $\tau$ , что не приводит к повышению силовой и тепловой напряженности шлифования. С учетом равенства  $K_{рез} = P_{z_{рез}} / P_{y_{рез}} = ctg(\psi + \gamma)$  и  $f_1 = tg\psi_1$  зависимость (2) опишется так:

$$K_{ш} = [ctg(\psi + \gamma) - tg\psi_1] \cdot (P_{y_{рез}} / P_y) + f_1, \quad (3)$$

где  $\psi_1$  – условный угол трения связки круга с обрабатываемым материалом.

Для осуществления процесса шлифования должно выполняться условие:  $ctg(\psi + \gamma) > tg\psi_1$  или  $tg(90^\circ - \psi - \gamma) > tg\psi_1$ , откуда  $90^\circ - \psi - \gamma > \psi_1$  или

$$\gamma < 90^\circ - \psi - \psi_1. \quad (4)$$

Для значений  $\psi = 10^\circ$  и  $\psi_1 = 20^\circ$  передний (отрицательный) угол режущего зерна  $\gamma$  должен быть меньше  $60^\circ$ , в противном случае процесс шлифо-

вания неосуществим – будет иметь место лишь процесс трения связки с обрабатываемым материалом. Этим показано, что увеличить  $K_{ш}$  и повысить эффективность шлифования можно за счёт повышения  $K_{рез}$  и  $P_{yрез}$ . Увеличение  $K_{рез}$  предполагает уменьшение углов  $\psi$  и  $\gamma$  за счет применения абразивных материалов, характеризующихся высокой остротой режущих кромок (СТМ). Увеличить  $P_{yрез}$  можно увеличением высот выступания зерен над уровнем связки круга, применяя методы правки круга, процесс алмазно-искрового шлифования, основанный на введении в зону резания дополнительной энергии в форме электрических разрядов.

В зависимости (1) и (2) входит неизвестная величина  $P_{yрез}$ , которая должна быть связана с фактической производительностью обработки  $Q = F \cdot V_{дем0}$ , где  $F$  – площадь поперечного сечения обрабатываемого прямолинейного образца,  $m^2$ ;  $V_{дем0}$  – фактическая линейная скорость съема материала,  $m/c$ . Для определения  $P_{yрез}$  следует представить  $P_{zрез} = K_{рез} \cdot P_{yрез}$  и  $P_{zрез} = \sigma \cdot (Q/V_{кр})$ , где  $\sigma$  – условное напряжение резания,  $H/m^2$ ;  $V_{кр}$  – скорость круга,  $m/c$ . Сравнивая эти две зависимости, получаем

$$P_{yрез} = \frac{\sigma}{K_{рез}} \cdot \frac{F \cdot V_{дем0}}{V_{кр}}. \quad (5)$$

Как видно, чем больше  $V_{дем0}$  и производительность обработки, тем больше  $P_{yрез}$ . При этом с уменьшением  $\sigma$  и увеличением  $K_{рез}$  и  $V_{кр}$  составляющая силы резания  $P_{yрез}$  уменьшается. Следовательно, достижение заданной скорости  $V_{дем0}$  происходит при меньшем значении  $P_{yрез}$ . Подставляя зависимость (5) в зависимости (1) и (2), получаем

$$P_z = \left(1 - \frac{f_1}{K_{рез}}\right) \cdot \frac{\sigma \cdot F \cdot V_{дем0}}{V_{кр}} + f_1 \cdot P_y; \quad (6)$$

$$K_{ш} = \left(1 - \frac{f_1}{K_{рез}}\right) \cdot \frac{\sigma \cdot F \cdot V_{дем0}}{V_{кр} \cdot P_y} + f_1. \quad (7)$$

С учетом соотношения [6]:  $\sigma = (2 \cdot \sigma_{сж}) / K_{рез}$  зависимость (7) принимает вид:

$$K_{ш} = \left(1 - \frac{f_1}{K_{рез}}\right) \cdot \frac{2 \cdot \sigma_{сж} \cdot F \cdot V_{дем0}}{K_{рез} \cdot V_{кр} \cdot P_y} + f_1, \quad (8)$$

где  $\sigma_{сж}$  – предел прочности на сжатие обрабатываемого материала,  $H/m^2$ .

**Результаты расчетов.** Из зависимости (8) вытекает, что с увеличением  $K_{рез}$  коэффициент шлифования  $K_{ш}$  будет увеличиваться. Это обусловлено

повышением режущей способности круга. Для оценки технологических возможностей шлифования необходимо провести анализ энергоёмкости обработки  $\Theta$ , которая с учетом зависимости (5) может быть описана формулой

$$\Theta = \frac{N}{Q} = \frac{(P_{z_{рез}} + P_{z_{мп}}) \cdot V_{кр}}{Q} = \frac{(\sigma + P_{z_{мп}}) \cdot \sigma}{K_{рез} \cdot P_{y_{рез}}} = \sigma \cdot \left[ 1 + \frac{(K_{ш} \cdot P_y - K_{рез} \cdot P_{y_{рез}})}{K_{рез} \cdot P_{y_{рез}}} \right] =$$

$$= \sigma \cdot \left[ 1 + \left( \frac{K_{ш}}{K_{рез}} \cdot \frac{P_y}{P_{y_{рез}}} - 1 \right) \right] = \sigma \cdot \frac{K_{ш}}{K_{рез}} \cdot \frac{P_y}{P_{y_{рез}}} = \sigma \cdot \frac{P_z}{P_{z_{рез}}} \quad (9)$$

Из зависимости (9) вытекает важное соотношение:

$$\frac{\Theta}{K_{ш}} = \frac{\sigma}{K_{рез}} \cdot \frac{P_y}{P_{y_{рез}}} = \frac{\sigma}{K_{рез}} \cdot \frac{1}{\left( \frac{P_{y_{рез}}}{P_y} \right)} = \frac{\sigma}{K_{рез}} \cdot \frac{1}{\left( 1 - \frac{P_{y_{мп}}}{P_y} \right)} \quad (10)$$

Как следует из рис. 2, а, с увеличением отношения  $P_{y_{рез}}/P_y$  от 0 до 1 отношение  $\Theta/K_{ш}$  непрерывно уменьшается и принимает наименьшее значение  $\sigma/K_{рез}$ , соответствующее процессу «чистого» резания при шлифовании. Следовательно, чем больше отношение  $P_{y_{мп}}/P_y$ , тем больше отношение  $\Theta/K_{ш}$ , которое может существенно превышать значения  $\sigma/K_{рез}$  (рис. 2, б). Это подтверждается известными экспериментальными данными, согласно которым отношение  $\Theta/K_{ш}$  может до 100 раз превышать  $\sigma/K_{рез}$ , например, при шлифовании алмазными кругами на прочных металлических связках, которые в процессе шлифования теряют режущую способность.

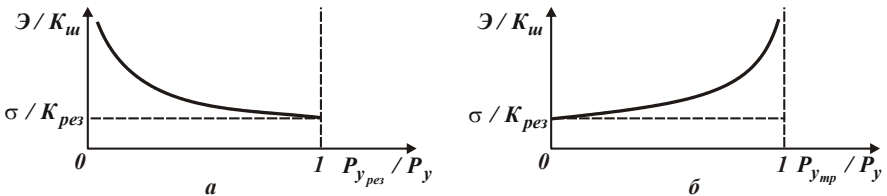


Рис. 2 – Зависимости: а –  $\Theta/K_{ш}$  от  $P_{y_{рез}}/P_y$ ; б –  $\Theta/K_{ш}$  от  $P_{y_{мп}}/P_y$ .

Заслуживает внимания анализ закономерностей изменения температуры резания  $\theta$  при шлифовании по упругой схеме с учетом зависимости, приведенной в работе [6], и соотношения (6):

$$\theta = \frac{q \cdot l_2}{\lambda} = \frac{P_z \cdot V_{кр} \cdot l_2}{\lambda \cdot F} = \left[ \left( 1 - \frac{f_1}{K_{рез}} \right) \cdot \sigma \cdot V_{дем0} + \frac{f_1 \cdot P_y \cdot V_{кр}}{F} \right] \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \tau}{c \cdot \rho \cdot \lambda}}, \quad (11)$$

где  $q = (P_z \cdot V_{кр})/F$  – плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;  $l_2 = \sqrt{2 \cdot \lambda \cdot \tau / (c \cdot \rho)}$  – глубина проникновения образуемого при шлифовании тепла в поверхность-

ный слой обрабатываемой детали,  $m$ ;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала,  $Вт/(м·К)$ ;  $c$  – удельная теплоемкость обрабатываемого материала,  $Дж/(кг·К)$ ;  $\rho$  – плотность обрабатываемого материала,  $кг/м^3$ ;  $F$  – площадь контакта шлифовального круга с обрабатываемым материалом,  $м^2$ .

Из зависимости (11) следует, что температура резания  $\theta$  при шлифовании увеличивается с увеличением времени обработки  $\tau$  лишь за счет увеличения глубины  $l_2$  проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали, то есть не столь значительно по сравнению со шлифованием по жесткой схеме (как показано в работе [5]). Это допускает достаточно продолжительный контакт круга с обрабатываемой деталью, тогда как при шлифовании по жесткой схеме с целью снижения температуры резания возможен непродолжительный контакт. Данная закономерность указывает на эффективность применения упругой схемы шлифования с точки зрения уменьшения температуры резания, несмотря на то, что при этом может значительно увеличиться параметр  $l_2$  по сравнению с жесткой схемой шлифования.

**Перспективы дальнейших исследований.** Автор считает перспективными направления исследований, связанные с разработкой на основе полученных теоретических решений эффективных технологических процессов финишной абразивной обработки ответственных деталей машин, в частности, высокоточных деталей гидроаппаратуры, обеспечивая высокие показатели точности, качества и производительности за счет снижения механических и температурных погрешностей обработки.

**Выводы.** Разработана математическая модель процесса шлифования с фиксированным радиальным усилием и на ее основе определены условия повышения точности и качества обрабатываемых поверхностей. Теоретически установлено, что в отличие от шлифования по жесткой схеме, при шлифовании с фиксированным радиальным усилием время обработки фактически не влияет на снижение показателей точности и качества обрабатываемых поверхностей в связи с исключением трения между связкой круга и обрабатываемым материалом. Это является важным фактором повышения эффективности обработки высокоточных деталей. При этом температура резания увеличивается не столь значительно по сравнению с шлифованием по жесткой схеме. Это допускает достаточно продолжительный контакт круга с обрабатываемой деталью, тогда как при шлифовании по жесткой схеме с целью снижения температуры резания возможен непродолжительный контакт.

**Список литературы:** 1. Маслов Е.Н. Теория шлифования металлов. – М.: Машиностроение, 1974. – 319 с. 2. Робочі процеси високих технологій в машинобудуванні: навч. посібник / За редакцією А.І. Грабченко. – Харків: ХДПУ, 1999. – 436 с. 3. Попов С.А., Малевский Н.П., Терещенко Л.М. Алмазно-абразивная обработка металлов и твердых сплавов. – М.: Машиностроение, 1977. – 263 с. 4. Узунян М.Д. Алмазно-искровое шлифование твердых сплавов. – Харків: НТУ «ХП», 2003. – 359 с. 5. Рябенков И.А., Новиков Ф.В. Оценка влияния интенсивности трения связки круга с обрабатываемым материалом на эффективность процесса шлифования // Вісник НТУ «ХП». Збірник наукових праць. Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у ма-

шинобудуванні та металургії. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 43 (1086). – С. 143 – 147. 6. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова, А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 4. Теория абразивной и алмазно-абразивной обработки материалов. – Одесса: ОНПУ. – 2002. – 802 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Maslov, E. N. *Teorija shlifovanija metallov*. Moscow: Mashinostroenie, 1974. Print. 2. *Robochi procesy vysokyh tehnologij v mashynobuduvanni: navch. posibnyk*. Ed. A. I. Grabchenko. Kharkiv: KDPU, 1999. Print. 3. Popov, S. A., N. P. Malevskij and L. M. Tereshhenko. *Almazno-abrazivnaja obrabotka metallov i tverdyh splavov*. Moscow: Mashinostroenie, 1977. Print. 4. Uzunjan, M. D. *Almazno-iskrovoe shlifovanie tverdyh splavov*. Kharkiv: NTU «KhPI», 2003. Print. 5. Rjabenkov, I. A., and F. V. Novikov. "Ocenka vlijanija intensivnosti trenija svjazki kruga s obrabatyvaemym materialom na effektivnost' processa shlifovanija." *Visnyk NTU «KhPI». Zbirnyk naukovykh prac'. Ser.: Innovaciyni tehnologii' ta obladnannja obrobky materialiv u mashynobuduvanni ta metalurgii'*. No. 43 (1086). Kharkiv: NTU «KhPI», 2014. 143–147. Print. 6. *Fiziko-matematicheskaja teorija processov obrabotki materialov i tehnologii mashinostroenija*. Ed. F. V. Novikova, A. V. Yakimova. *V desjati tomah*. Vol. 4. "Teorija abrazivnoj i almazno-abrazivnoj obrabotki materialov." Odessa: ONPU, 2002. Print.

*Поступила (received) 18.03.2015*

УДК 625.282:625.032.07

**Е.С. РЯБОВ**, канд. техн. наук, ГП завод «Электротяжмаш», Харьков

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА С АСИНХРОННЫМ ТЯГОВЫМ ПРИВОДОМ В РЕЖИМЕ ОГРАНИЧЕНИЯ ТОКА ТЯГОВОЙ СЕТИ**

Рассмотрено использование накопителей энергии в составе тягового электропривода электроподвижного состава. Показана целесообразность их использования в режиме ограничения тока тяговой сети при расположении накопителя энергии на подвижном составе. Предложен способ определения параметров накопителя при работе в режиме ограничения тока тяговой сети при его использовании в составе асинхронного тягового привода и получены аналитические расчетные выражения для определения параметров накопителя.

**Ключевые слова:** асинхронный тяговый привод, накопитель энергии, подвижной состав, тяговая характеристика.

**Введение.** Эффективным средством энергосбережения и повышения надежности работы электроподвижного состава является применение *накопителей энергии* (НЭ), которые позволяют аккумулировать энергию при торможении и обеспечивают ее отдачу в привод в тяговом режиме его работы [1]. Задача о выборе места расположения накопителя энергии – на транспортном средстве или на тяговой подстанции – очевидно, не может быть решена однозначно, поскольку накопитель может использоваться для разных целей. Между тем, в ряде работ, например, в [2], показано, что использование накопителей энергии на борту транспортного средства в целях аккумулирования энергии рекуперации имеет преимущества: во-первых, отсутствуют

© Е.С. Рябов, 2015