

**СЕРГЕЕВ А. С.**

### УСЛОВИЯ СНИЖЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ РЕЗАНИЯ ПРИ ВНУТРЕННЕМ ШЛИФОВАНИИ

Проведен теоретический анализ возможности уменьшения температуры резания при внутреннем шлифовании. Установлено, что увеличение длины дуги контакта шлифовального круга с обрабатываемой деталью является важным фактором уменьшения температуры резания и, соответственно, повышения качества и производительности обработки. Эффект достигается в результате увеличения скорости детали. При этом глубина шлифования может оставаться постоянной, тогда как в традиционных схемах многопроходного шлифования увеличение скорости детали связано с уменьшением глубины шлифования при заданной производительности обработки. Этим показано, что за счет увеличения длины дуги контакта шлифовального круга с обрабатываемой деталью можно одновременно достигать уменьшения температуры резания и увеличения производительности обработки. Практической реализацией полученного решения является предложенный метод внутреннего шлифования, в котором ось вращения шлифовального круга с индивидуальным приводом устанавливается перпендикулярно оси вращения обрабатываемого отверстия. Для снижения интенсивности трения в зоне шлифования предложено обработку производить кругами с мягкой основой, например, мягким войлочным (фетровым) кругом с наклеенным слоем абразивного порошка 63С 20П. Этот круг одновременно позволяет уменьшить шероховатость поверхности и температуру резания, что имеет большое теоретическое и практическое значение при финишной обработке отверстий в пневмо- и гидроцилиндрах. Проведенные исследования показали, что применение предложенного метода внутреннего шлифования позволяет повысить качество и производительность за счет снижения теплонпряженности процесса резания. Установлено, что на обрабатываемых поверхностях отсутствуют температурные дефекты.

**Ключевые слова:** качество и производительность обработки, обрабатываемое отверстие, мягкий войлочный круг, абразивный порошок, температурные дефекты, шероховатость поверхности.

**СЕРГЄЄВ О. С.**

### УМОВИ ЗНИЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ РІЗАННЯ ПРИ ВНУТРІШНЬОМУ ШЛІФУВАННІ

Проведено теоретичний аналіз можливості зменшення температури різання при внутрішньому шліфуванні. Встановлено, що збільшення довжини дуги контакту шліфувального круга з оброблюваною деталлю є важливим фактором зменшення температури різання й, відповідно, підвищення якості та продуктивності обробки. Ефект досягається в результаті збільшення швидкості деталі. При цьому глибина шліфування може залишатися незмінною, тоді як в традиційних схемах багатопрохідного шліфування збільшення швидкості деталі пов'язано зі зменшенням глибини шліфування при заданій продуктивності обробки. Цим показано, що за рахунок збільшення довжини дуги контакту шліфувального круга з оброблюваною деталлю можна одночасно досягати зменшення температури різання і збільшення продуктивності обробки. Практичною реалізацією отриманого рішення є запропонований метод внутрішнього шліфування, в якому вісь обертання шліфувального круга з індивідуальним приводом встановлюється перпендикулярно осі обертання оброблюваного отвору. Для зниження інтенсивності тертя в зоні шліфування запропоновано обробку здійснювати кругами з м'якою основою, наприклад, м'яким повстяним (фетровим) кругом з наклеєним шаром абразивного порошку 63С 20П. Цей круг одночасно дозволяє зменшити шорсткість поверхні та температуру різання, що має велике теоретичне і практичне значення при фінішній обробці отворів в пневмо- і гідроциліндрах. Проведені дослідження показали, що застосування запропонованого методу внутрішнього шліфування дозволяє підвищити якість та продуктивність за рахунок зниження теплової напруженості процесу різання. Встановлено, що на оброблених поверхнях відсутні температурні дефекти.

**Ключові слова:** якість та продуктивність обробки, отвір, що обробляється, м'який повстяний круг, абразивний порошок, температурні дефекти, шорсткість поверхні.

**SERHIEIEV ALEXANDER**

### CONDITIONS FOR REDUCING CUTTING TEMPERATURE DURING INTERNAL GRINDING

A theoretical analysis of the possibility of reducing the cutting temperature during internal grinding. It has been established that increasing the length of the arc of contact between the grinding wheel and the workpiece is an important factor in reducing the cutting temperature and, accordingly, improving the quality and productivity of processing. The effect is achieved by increasing the speed of the part. At the same time, the grinding depth can remain constant, whereas in traditional multi-pass grinding schemes, an increase in the speed of a part is associated with a decrease in the grinding depth for a given processing productivity. This shows that by increasing the length of the arc of contact between the grinding wheel and the workpiece, it is possible to simultaneously achieve a decrease in cutting temperature and an increase in processing productivity. A practical implementation of the obtained solution is the proposed method of internal grinding, in which the axis of rotation of the grinding wheel with an individual drive is set perpendicular to the axis of rotation of the machined hole. To reduce the friction intensity in the grinding zone, it is proposed to carry out processing in circles with a soft base, for example, a soft felt (felt) circle with a glued layer of abrasive powder 63C 20P. This circle at the same time allows to reduce surface roughness and cutting temperature, which is of great theoretical and practical importance when finishing holes in pneumatic and hydraulic cylinders. Studies have shown that the application of the proposed method of internal grinding can improve the quality and productivity by reducing the heat stress of the cutting process. It has been established that there are no temperature defects on the treated surfaces.

**Keywords:** processing quality and performance, hole being machined, soft felt wheel, abrasive powder, temperature defects, surface roughness.

**Введение.** Создание современных машин и систем требует высококачественного изготовления деталей и их сборки. Важная роль в этом принадлежит процессам механической обработки деталей и в особенности процессам шлифования, где, как правило, окончательно формируются параметры качества обработки. Однако процессам шлифования присущи существенные недостатки, связанные с возможностью появления на обрабатываемых

поверхностях прижогов и других дефектов из-за высоких температур резания. Основной причиной возникновения увеличенных температур резания является небольшая площадь контакта шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью. Поэтому важным фактором ее увеличения следует рассматривать применение более эффективных кинематических схем шлифования, например, шлифования торцом круга, глубинного шлифования и

т.д., характеризующихся увеличенными длинами контакта шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью. Однако эти схемы шлифования более применимы к условиям круглого наружного и плоского шлифования. При внутреннем шлифовании они или неприменимы, или малоэффективны. Поэтому актуальной задачей является разработка новых кинематических схем внутреннего шлифования, позволяющих уменьшить температуру резания и тем самым повысить качество и производительность обработки.

## 2. Анализ последних исследований и публикаций.

В работах [1-3] обоснована эффективность применения вместо схемы обычного шлифования периферией круга схемы шлифования торцом круга, позволяющей уменьшить температуру резания и повысить качество обработки за счет уменьшения плотности теплового потока. В работе [4] предложено использовать схему внутреннего шлифования, устанавливая ось вращения шлифовального круга с индивидуальным приводом перпендикулярно оси вращения обрабатываемого отверстия (рис. 1 [5]). В этом случае существенно увеличивается длина дуги контакта шлифовального круга с обрабатываемой

деталью, что обеспечивает уменьшение шероховатости обработанной поверхности. Особенно эффективно обработку по данной схеме осуществлять с применением кругов с мягкой основой, что позволяет дополнительно увеличить площадь контакта шлифовального круга с обрабатываемой деталью и соответственно уменьшить шероховатость обработанной поверхности. Экспериментально установлено, что в течение 30 минут шлифования по данной схеме на модернизированном токарном станке модели 1М63 (частота вращения шпинделя – 200 об./мин; частота вращения шлифовального круга – 1400 об./мин) достигается шероховатость поверхности  $Ra = 0,04$ .

Однако возможности практического применения данной схемы внутреннего шлифования могут быть значительно расширены благодаря возможности уменьшения еще и температуры резания за счет увеличения длины дуги контакта шлифовального круга с обрабатываемой деталью. В связи с этим важно провести теоретический анализ закономерностей формирования температуры резания и на этой основе определить рациональные условия шлифования по температурному критерию.

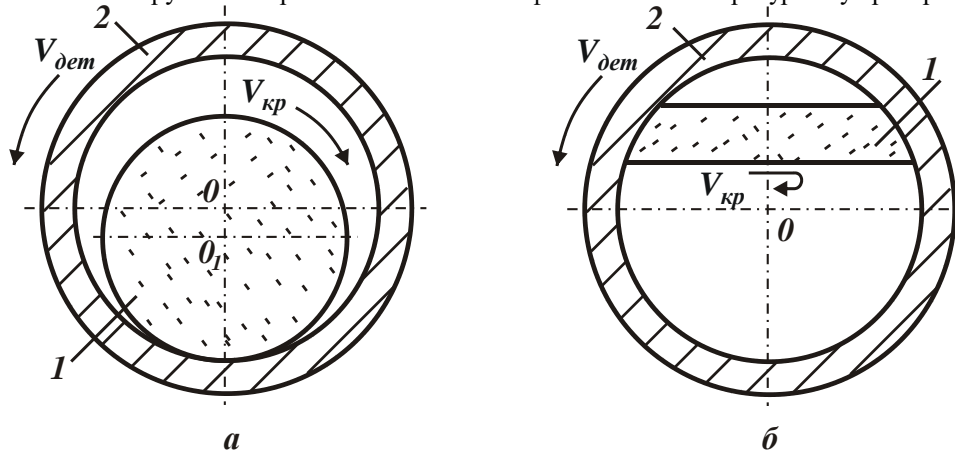


Рис. 1 – Схемы обычного внутреннего шлифования (а) и шлифования с перпендикулярным расположением осей вращения круга и детали (б): 1 – круг; 2 – обрабатываемая деталь

**4. Цель исследования.** Повышение качества обработки при внутреннем шлифовании за счет снижения температуры резания путем применения схемы внутреннего шлифования, в которой ось вращения шлифовального круга с индивидуальным приводом устанавливается перпендикулярно оси вращения обрабатываемого отверстия.

**5. Изложение основного материала.** Для решения поставленных задач следует воспользоваться аналитической зависимостью для определения температуры резания при шлифовании, полученной профессором Якимовым А. В. [1] и получившей широкое применение при анализе закономерностей управления тепловыми процессами при шлифовании:

$$\theta = \frac{q}{2} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot l}{\lambda \cdot c \cdot \rho \cdot V_{дет}}}, \quad (1)$$

где  $q = P_z \cdot V_{кр} \cdot \bar{\psi} / F$  – плотность теплового потока, характеризующая количество теплоты, проходящей через единицу поверхности детали в единицу

времени, Вт/м<sup>2</sup>;  $\bar{\psi}$  – коэффициент, показывающий, какая часть работы переходит в теплоту, поглощаемую обрабатываемой деталью (например, по данным работы [6] для алмазного шлифования необходимо принимать  $\bar{\psi} = 0,4$ , поскольку в теплоту переходит 80 % от всей работы, а обрабатываемой заготовкой поглощается 50 % теплоты);  $P_z$  – тангенциальная составляющая силы резания, Н;  $V_{кр}$  – скорость круга, м/с;  $F = B \cdot l$  – площадь контакта шлифовального круга с обрабатываемой деталью, м<sup>2</sup>;  $B$  – ширина шлифования, м;  $l$  – длина дуги контакта шлифовального круга с обрабатываемой деталью, м;  $V_{дет}$  – скорость детали, м/с;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/(м·К);  $c$  – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(кг·К);  $\rho$  – плотность обрабатываемого материала, кг/м<sup>3</sup>.

Зависимость (1) представлена в самом общем виде. Поэтому ее необходимо привести к конкретным условиям шлифования, выражая тангенциальную составляющую силы резания следующей зависимостью [6]:  $P_z = \sigma \cdot S_{мгн}$ , где  $\sigma$  – условное напряжение резания, Н/м<sup>2</sup>;  $S_{мгн} = Q/V_{кр}$  – мгновенная суммарная площадь поперечного сечения среза всеми одновременно работающими абразивными зернами шлифовального круга, м<sup>2</sup>;  $Q = B \cdot t \cdot V_{дем}$  – производительность обработки, м<sup>3</sup>/с;  $t$  – глубина шлифования, м. Тогда  $P_z = \sigma \cdot B \cdot t \cdot V_{дем}/V_{кр}$ , а плотность теплового потока выразится:  $q = \sigma \cdot V_{дем} \cdot t \cdot \bar{\psi}/l$ . Соответственно температура резания  $\theta$  определится:

$$\theta = \frac{\sigma \cdot t \cdot \bar{\psi}}{2} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot V_{дем}}{\lambda \cdot c \cdot \rho \cdot l}} = \frac{\sigma \cdot \bar{\psi}}{2} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot Q \cdot t}{\lambda \cdot c \cdot \rho \cdot B \cdot l}} \quad (2)$$

При плоском шлифовании, представляя  $l = \sqrt{2 \cdot t \cdot R_{кр}}$  [4], зависимость (2) принимает вид:

$$\theta = \frac{\sigma \cdot \bar{\psi}}{2} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot Q}{\lambda \cdot c \cdot \rho \cdot B}} \cdot \sqrt{\frac{t}{2 \cdot R_{кр}}}, \quad (3)$$

где  $R_{кр}$  – радиус круга, м.

Из зависимости (3) вытекает, что с уменьшением глубины шлифования  $t$  при обычном плоском шлифовании периферией круга и условии  $Q = const$  (т.е. при пропорциональном увеличении скорости детали  $V_{дем}$ ) температура резания  $\theta$  уменьшается. Следовательно, для уменьшения температуры резания  $\theta$  эффективно использовать схему многопроходного шлифования с увеличенной скоростью детали  $V_{дем}$ . Важным фактором уменьшения температуры резания  $\theta$  необходимо также рассматривать уменьшение условного напряжения резания  $\sigma$  за счет применения шлифовальных кругов с мягкой основой, например, мягкого войлочного (фетрового) круга с наклеенным слоем абразивного порошка 63С 20П [5], снижающего интенсивность трения в зоне шлифования. Увеличение радиуса круга  $R_{кр}$ , исходя из зависимости (3), способствует снижению температуры резания  $\theta$ , однако не существенно.

В зависимости (2) отношение  $l/V_{дем}$  определяет время контакта шлифовального круга с обрабатываемой деталью: с его увеличением температура резания  $\theta$  уменьшается. Поэтому, очевидно, целесообразно шлифование производить с увеличенной длиной дуги контакта шлифовального круга с обрабатываемой деталью  $l$ . Эффективным решением в этом направлении является применение схемы внутреннего шлифования, в которой ось вращения шлифовального круга с индивидуальным приводом устанавливается перпендикулярно оси вращения обрабатываемого отверстия (рис. 2 [5]).



Рис. 2 – Схема внутреннего шлифования

По сравнению с традиционно применяемой схемой круглого внутреннего шлифования, длина дуги контакта шлифовального круга с обрабатываемой деталью  $l$  в этом случае может быть увеличена в несколько раз. Следовательно, это создает условия уменьшения температуры резания  $\theta$  и, соответственно, повышения качества и производительности обработки.

В зависимости (2) произведение  $B \cdot l = F$ . Поэтому, во сколько раз увеличится площадь контакта шлифовального круга с обрабатываемой деталью  $F$  от применения указанной схемы внутреннего шлифования, во столько раз может быть увеличена производительность обработки  $Q$  при заданной температуре резания  $\theta$ . Дополнительным фактором повышения производительности обработки  $Q$  или уменьшения температуры резания  $\theta$  в этом случае необходимо рассматривать уменьшение условного напряжения резания  $\sigma$  за счет применения шлифовальных кругов с мягкой основой, снижающих интенсивность трения в зоне шлифования.

Уменьшение глубины шлифования  $t$  также способствует увеличению производительности обработки  $Q$  или уменьшению температуры резания  $\theta$  при условии  $Q = const$ . Причем, эффект от уменьшения глубины шлифования  $t$  будет более значительным, чем при использовании схемы шлифования периферией круга, поскольку параметр  $t$  входит в зависимость (2) с большей степенью, чем в зависимость (3).

Следуя зависимости (2), за счет увеличения длины дуги контакта шлифовального круга с обрабатываемой деталью  $l$  можно пропорционально увеличивать скорость детали  $V_{дем}$ , сохраняя заданной температуру резания  $\theta$  и увеличивая тем самым производительности обработки  $Q = B \cdot t \cdot V_{дем}$  без уменьшения глубины шлифования  $t$ . Это открывает новые возможности осуществления на практике схемы высокопроизводительного многопроходного шлифования при одновременном обеспечении высокого качества обрабатываемых поверхностей.

Таким образом показано, что существуют различные направления уменьшения температуры резания  $\theta$  и увеличения производительности обработки  $Q$  на основе использования прогрессивной

схемы внутреннего шлифования, в которой ось вращения шлифовального круга с индивидуальным приводом устанавливается перпендикулярно оси вращения обрабатываемого отверстия (рис. 2 [5]). Наряду с уменьшением шероховатости поверхности [7], данная схема позволяет уменьшить и температуру резания  $\theta$ , что, во-первых, обеспечивает высококачественную обработку, во-вторых, позволяет производить финишную обработку с более высокой производительностью без образования на обрабатываемых поверхностях прижогов, микротрещин и других температурных дефектов. При этом имеет место изменение направления образования рисок от проработавших зерен. Они образуются фактически вдоль обрабатываемой поверхности, а это положительно сказывается, например, на работоспособности обработанных поверхностей отверстий в пневмо- и гидроцилиндрах, финишная обработка которых традиционно производится по схеме внутреннего шлифования периферией обычного абразивного круга с низким качеством обработки.

Результаты практического применения предложенного метода внутреннего шлифования поверхностей в пневмо- и гидроцилиндрах показали на его высокую эффективность. По показателям качества и производительности обработки данный метод шлифования превосходит применяемый метод обычного внутреннего шлифования и открывает новые возможности создания конкурентоспособной машиностроительной продукции.

**Выводы.** Проведен теоретический анализ возможности уменьшения температуры резания при внутреннем шлифовании. Установлено, что увеличение длины дуги контакта шлифовального круга с обрабатываемой деталью является важным фактором уменьшения температуры резания и, соответственно, повышения качества и производительности обработки. Эффект достигается в результате увеличения скорости детали. При этом глубина шлифования может оставаться постоянной, тогда как в традиционных схемах многопроходного шлифования увеличение скорости детали связано с уменьшением глубины шлифования при заданной производительности обработки. Этим показано, что за счет увеличения длины дуги контакта шлифовального круга с обрабатываемой деталью можно одновременно достигать уменьшения температуры резания и увеличения производительности обработки. Практической реализацией полученного решения является предложенный метод внутреннего шлифования, в котором ось вращения шлифовального круга с индивидуальным приводом устанавливается перпендикулярно оси вращения обрабатываемого отверстия. Для снижения интенсивности трения в зоне шлифования предложено обработку производить кругами с мягкой основой, например, мягким войлочным (фетровым) кругом с наклеенным слоем абразивного порошка 63С 20П. Этот круг

одновременно позволяет уменьшить шероховатость поверхности и температуру резания, что имеет большое теоретическое и практическое значение при финишной обработке отверстий в пневмо- и гидроцилиндрах. Проведенные исследования показали, что применение предложенного метода внутреннего шлифования позволяет повысить качество и производительность за счет снижения теплонапряженности процесса резания. Установлено, что на обрабатываемых поверхностях отсутствуют температурные дефекты, а шероховатость обработанной поверхности составляет не более  $Ra=0,04$  мкм. Это отвечает требованиям к изготовлению пневмо- и гидроцилиндров.

#### Список литературы:

1. Якимов А. В. *Прерывистое шлифование* / А. В. Якимов. – Киев–Одесса : Изд. объедин. "Вища школа", 1986. – 175 с.
2. Захаренко И. П. *Алмазная заточка твердосплавного инструмента совместно со стальной державкой* / И. П. Захаренко, А. А. Шепелев. – Киев: Наук. думка, 1976. – 219 с.
3. Рыбицкий В. А. *Алмазное шлифование твердых сплавов* / В. А. Рыбицкий. – Киев : Наукова думка, 1980. – 223 с.
4. *Современные технологии и техническое перевооружение предприятий*: монография / Ф. В. Новиков, В. А. Жовтобрюх, А. А. Андिलाхай, Д. Ф. Новиков, В. И. Полянский. – Днепр : ЛИРА, 2018. – 400 с.
5. Сергеев А. С. *Высокоэффективная технология внутреннего шлифования отверстий в пневмо- и гидроцилиндрах* / А. С. Сергеев // *Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії*: матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції, присвяченої 90-річчю заснування кафедри обробки металів тиском, 20–22 листопада 2019 р. Харків. – Харків: НТУ «ХП», 2019. – С. 144–145
6. Сипайлов В. А. *Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности* / В. А. Сипайлов. – М.: Машиностроение, 1978. – 166 с.
7. Новиков Ф. В. *Условия уменьшения шероховатости поверхности при финишной абразивной обработке отверстий в цилиндрах* / Ф. В. Новиков, А. А. Андिलाхай
8. А. С. Сергеев // *Инженер-механик: Республиканский межотраслевой производственно-практический журнал*. – №3(84), июль – сентябрь 2019. – Беларусь, Минск, 2019. – С. 26–27

#### References (transliterated)

1. Yakimov A. V. *Preryvistoye shlifovaniye* [Intermittent grinding]. – Kiyev–Odessa, Izd. ob"yed. "Vishcha shkola". 175 s. (1986).
2. Zakharenko I. P., Shepelev A. A. *Almaznaya zatochka tverdosplavnogo instrumenta sovmesno so stal'noy derzhavkoy* [Diamond sharpening of carbide tools together with a steel holder]. Kiyev, Naukova dumka. 219 s. (1976).
3. Rybitskiy V. A. *Almaznoye shlifovaniye tverdykh splavov* [Diamond grinding of hard alloys]. Kiyev, Naukova dumka. 223 s. (1980).
4. Novikov F.V., Zhovtobryukh V.A., Andilakhay A.A., Novikov D.F., Polyanskiy V. I. *Sovremennyye tekhnologii i tekhnicheskoye perevooruzheniye predpriyatiy* [Modern technologies and technical re-equipment of enterprises]: monografiya. Dnepr, LIRA. 400 p. (2018).
5. Sergeev A. S. *Vysokoeffektivnaya tekhnologiya vnutrennego shlifovaniya otverstiy v pnevmo- i gidrotsilindrakh* [Highly efficient internal grinding of holes in pneumatic and hydraulic cylinders] / *Resursozberzhennya ta enerhoeffektyvnist' protsesiv i obladnannya obrobky tyskom u mashynobuduvanni ta metalurhiyi* [Resource saving and energy efficiency of processes and equipment of pressure treatment in mechanical engineering and metallurgy]: materialy

6. XI Mizhnarodnoyi naukovо-tekhnichnoyi konferentsiyi, prysvyachenoyi 90-richchyu zasnuvannya kafedry obrobky metaliv tyskom. – Kharkiv: NTU «KHPi». 144-145 (2019).
7. Sipaylov V. A. *Teplovyye protsessy pri shlifovanii i upravleniye kachestvom poverkhnosti* [Thermal processes during grinding and surface quality control]. Moskva, Mashinostroyeniye. 166 s. (1978).
8. Novikov F. V., Andilakhay A. A., Serhieiev A. S. *Usloviya umen'sheniya sherokhovatosti poverkhnosti pri finishnoy*

*abrazivnoy obrabotke otverstiy v tsilindrakh* [Conditions for reducing surface roughness during finish abrasive treatment of holes in cylinders] / *Inzhener-mekhanik: Respublikanskiy mezhotraslevoy proizvodstvenno-prakticheskiy zhurnal* [Mechanical Engineer: Republican Intersectoral Production and Practice Journal]. 3(84), Belarus, Minsk. 26–27 (2019)/

*Поступила (received) 15.05.2020*

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Сергеев Александр Сергійович (Сергеев Александр Сергеевич, Serhieiev Alexander)** – аспірант кафедри «Технологія машинобудування», ДВНЗ «ПДТУ», м. Маріуполь; тел.: +38-068-78-08-555; e-mail: andilayahaa@gmail.com ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8974-9872>