

"Vzaimodejstvie uprugih voln s cilindricheskoj polostju v uslovijah ploskoj deformacii." *Visnyk NTU «KhPI». Tematychnyj vypusk: Dynamika i micnist' mashyn.* No. 47. 2005. 112–117. Print. **4.** Guljaev, Yu. V., et al. "Issledovanie difrakcii uprugih voln na plastinah, oslablennyh dvumja otverstijami proizvol'noj formy." *DAN. Matematicheskaja fizika.* Vol. 349. No. 2. 1996. 175–179. Print. **5.** Guz', A. N. "O koncentracii naprjazhenij okolo neskol'kih otverstij v elementah konstrukcii." *Prikl. mehanika.* Vol. 30. No. 4. 1994. 6–13. Print. **6.** Guz', A. N., V. D. Kubenko and M. A. Cherevko. *Difrakcija uprugih voln.* Kiev: Nauk. dumka, 1978. Print. **7.** Nazarenko, A. M., and A. M. Lozhkin. "Vzaimodejstvie ploskih garmonicheskikh voln s periodicheskoj sistemoj nepodviznyh cilindricheskikh vključenij v uslovijah ploskoj deformacii." *Visnyk NTU «KhPI». Tematychnyj vypusk: Dynamika i micnist' mashyn.* No. 20. 2005. 129–134. Print. **8.** Nazarenko, A. M., and A. M. Lozhkin. "Difrakcija ploskih garmonicheskikh voln na periodicheskoj sisteme zhestkikh cilindrov." *Mezhved. nauchnyj sbornik «Dinamicheskie sistemy».* No. 2. 2006. 81–88. Print. **9.** Panasjuk, V. V., M. P. Savruk and Z. T. Nazarchuk. *Metod singularnyh integral'nyh uravnenij v dvumernyh zadachah difrakcii.* Kiev: Nauk. dumka, 1984. Print.

Надійшла (received) 03.09.2015

Назаренко Олександр Максимович – кандидат фізико-математичних наук, доцент, Сумський державний університет, м. Суми; тел.: (066) 921-55-34; e-mail: aleksandr-nazarenko54@mail.ru.

Назаренко Александр Максимович – кандидат физико-математических наук, доцент, Сумской государственной университет, г. Сумы; тел.: (066) 921-55-34; e-mail: aleksandr-nazarenko54@mail.ru.

Nazarenko Aleksandr Maksimovich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Sumy State University, Sumy; tel.: (066) 921-55-34; e-mail: aleksandr-nazarenko54@mail.ru.

УДК 621.923

Ф. В. НОВИКОВ, О. С. КЛЁНОВ, И. В. ГЕРШИКОВ

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛООВОГО ПРОЦЕССА ПРИ ШЛИФОВАНИИ

Предложено новое теоретическое решение по определению температуры резания и глубины проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали при шлифовании с учетом перерезания шлифовальным кругом адиабатических стержней, набором которых условно представлен снимаемый припуск. Показано, что с течением времени обработки температура резания непрерывно увеличивается, асимптотически приближаясь к определенному значению, а глубина проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали при шлифовании принимает конечное значение.

Ключевые слова: шлифование, тепловой процесс, температура резания, адиабатический стержень, время.

Введение. Шлифование является наиболее эффективным методом финишной обработки деталей машин, обеспечивающим высокое качество и точность обрабатываемых поверхностей. Однако, в связи с наличием неблагоприятных отрицательных передних углов режущих зерен и интенсивного трения связки круга с обрабатываемым материалом возможно увеличение силовой напряженности процесса шлифования, что приводит к появлению на обрабатываемых поверхностях различных температурных дефектов (прижогов, микротрещин, микро- и макрос колов, и так далее). Это снижает качество обработки и приводит к потерям от брака изготавливаемых деталей. Чтобы повысить режущую способность шлифовального круга и исключить появление температурных дефектов, применяют разнообразные методы правки круга, технологические среды, прерывистые и импрегнированные круги, и так далее. Вместе с тем, это не позволяет в полной мере решить проблему качества обработки в связи с высокой теплонапряженностью процесса шлифования. Поэтому актуально проведение теоретического анализа условий уменьшения температуры резания при шлифовании на основе новых теоретических подходов.

Анализ последних исследований. Вопросам теплофизики процесса шлифования посвящены многочисленные работы профессоров Маслова Е.Н., Яцерицына П.И., Резникова А.Н., Корчака С.Н., Худобина Л.В., Якова А.В., Сипайлова В.А., Островского В.И., Сагарды А.А., Силина С.С., Евсеева Д.Г., Филимонова Л.Н., Усова А.В. и других ученых. Так, в работах [1 – 3] решение задачи определения температуры резания при шлифовании базируется на решении дифференциального уравнения теплопроводности. Однако, в силу сложности его решения не установлена истинная глубина проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали при шлифовании – в приведенных решениях она принимает бесконечное значение. Это ограничивает возможности обоснованного выбора оптимальных условий обработки и требует установления глубины проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали при шлифовании и максимальной температуры резания.

Постановка задачи. В работе [4] предложена схема расчета температуры резания при шлифовании, согласно которой снимаемый припуск представлен пакетом бесконечно тонких адиабатических стержней, расположенных перпендикулярно направлению движения шлифовального круга (рис. 1). Шлифовальный круг в результате перемещения со скоростью $V_{\text{дем}}$ некоторое время контактирует с торцом адиабатического стержня, вызывая его нагрев. Принимается, что образующееся в процессе шлифования тепло распространяется лишь вдоль прямолинейного адиабатического стержня. При этом перерезание стержня длиной, равной глубине шлифования, не рассматривается, то есть процесс нагрева стержня происходит в результате трения шлифовального круга с

© Ф. В. Новиков, О. С. Клёнов, И. В. Гершиков, 2015

торцевой поверхностью стержня. Очевидно, это существенно упрощает расчет температуры резания при шлифовании, что может привести к значительному расхождению расчетных и экспериментальных данных. В связи с этим важно оценить достоверность применяемых подходов к расчету температуры резания при шлифовании, не учитывающих перерезание адиабатических стержней, которыми условно представлен снимаемый припуск, в процессе шлифования. В работах [5, 6] предложены подходы к аналитическому расчету температуры резания при шлифовании с учетом перерезания адиабатических стержней шлифовальным кругом. Чтобы уточнить полученные решения, в настоящей работе поставлена задача численного расчета температуры резания при шлифовании с учетом перерезания адиабатических стержней шлифовальным кругом.

Математическая модель. В основу расчета положена аналитическая зависимость для определения глубины проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали при шлифовании, то есть глубины проникновения тепла в рассматриваемый адиабатический стержень (рис. 1) [5]:

$$l_2 = \sqrt{2 \cdot \lambda \cdot \tau / (c \cdot \rho)}, \tag{1}$$

где λ – коэффициент теплопроводности материала обрабатываемой детали, Вт/м·К; c – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); ρ – плотность материала обрабатываемой детали, кг/м³; τ – время контакта шлифовального круга с адиабатическим стержнем, с; $V_{кр}$, $V_{дет}$ – скорости круга и детали, м/с; t – глубина шлифования, м.

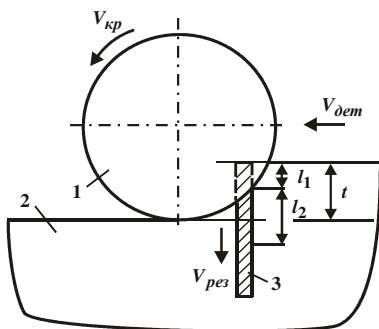


Рис. 1 – Расчетная схема параметров теплового процесса при плоском шлифовании: 1 – круг; 2 – деталь; 3 – адиабатический стержень.

Согласно зависимости (1), параметр l_2 определяется одной переменной величиной τ . Чем она больше, тем больше l_2 , то есть чем больше тепла поступает в адиабатический стержень, тем больше l_2 и тем больше стержень нагревается. Данная закономерность справедлива при действии теплового потока q на неподвижную торцевую поверхность адиабатического стержня. Если же рассматривать движение теплового потока q вдоль адиабатического стержня с фиксированной скоростью $V_{рез}$, определяемой скоростью перерезания стержня шлифовальным кругом, то закономерности формирования параметра l_2 и температуры резания изменятся. Для удобства анализа непрерывное равномерное движение со скоростью $V_{рез}$ теплового источника вдоль адиабатического стержня можно рассматривать с периодическим шагом $V_{рез} \cdot d\tau$, где $d\tau$ – бесконечно малое время, с. Тогда за время $d\tau$ глубина проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали определится так:

$$l_{2_0} = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho} \cdot d\tau}. \tag{2}$$

В связи с перерезанием части адиабатического стержня длиной $V_{рез} \cdot d\tau$ глубина проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали уменьшится на величину $V_{рез} \cdot d\tau$ и станет равной

$$l_{2_1} = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho} \cdot d\tau} - V_{рез} \cdot d\tau. \tag{3}$$

Учитывая то, что параметр l_2 , исходя из зависимости (1), определяется лишь одной переменной τ , зависимость (3) можно представить в виде:

$$l_{2_1} = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho} \cdot \tau_1}, \tag{4}$$

где τ_1 – время нагрева адиабатического стержня при его перерезании на величину $V_{рез} \cdot d\tau$, с.

Сравнивая зависимости (3) и (4), получаем:

$$\tau_1 = \frac{c \cdot \rho}{2 \cdot \lambda} \cdot \left(\sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho} \cdot d\tau} - V_{рез} \cdot d\tau \right)^2 = d\tau \cdot (1 - \alpha)^2, \tag{5}$$

где $\alpha = V_{рез} \cdot d\tau / l_{2_0} < 1$.

Как видно, $\tau_1 < d\tau$, то есть вследствие перерезания части адиабатического стержня длиной $V_{рез} \cdot d\tau$ время нагрева стержня уменьшилось, что в соответствии с зависимостью (4) приводит к уменьшению параметра l_{2_1} :

$$l_{2_1} = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho} \cdot \tau_1} \cdot (1 - \alpha) = l_{2_0} \cdot (1 - \alpha). \tag{6}$$

При втором шаге теплового источника на величину $V_{pez} \cdot d\tau$ параметр l_{2_2} , аналогично l_{2_1} , определится так:

$$l_{2_2} = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho} \cdot (d\tau + \tau_1) - V_{pez} \cdot d\tau}. \quad (7)$$

С другой стороны:

$$l_{2_2} = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho} \cdot \tau_2}, \quad (8)$$

где τ_2 – время нагрева адиабатического стержня при его перерезании на величину $2 \cdot V_{pez} \cdot d\tau$, с.

Сравнивая зависимости (7) и (8), получаем:

$$\tau_2 = \frac{c \cdot \rho}{2 \cdot \lambda} \cdot \left(\sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho} \cdot (d\tau + \tau_1) - V_{pez} \cdot d\tau} \right)^2 = d\tau \cdot \left(\sqrt{1 + \frac{\tau_1}{d\tau} - \alpha} \right)^2. \quad (9)$$

С учетом зависимости (5) имеем:

$$\tau_2 = d\tau \cdot \left[\sqrt{1 + (1 - \alpha)^2} - \alpha \right]^2. \quad (10)$$

Очевидно, что $\tau_2 > \tau_1$. Тогда

$$l_{2_2} = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho} \cdot d\tau} \cdot \left[\sqrt{1 + (1 - \alpha)^2} - \alpha \right] = l_{2_0} \cdot \left[\sqrt{1 + (1 - \alpha)^2} - \alpha \right]. \quad (11)$$

При третьем шаге теплового источника на величину $V_{pez} \cdot d\tau$ параметр l_{2_3} , аналогично l_{2_2} , определится так:

$$l_{2_3} = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho} \cdot (d\tau + \tau_2) - V_{pez} \cdot d\tau}; \quad l_{2_3} = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho} \cdot \tau_3}, \quad (12)$$

где τ_3 – время нагрева адиабатического стержня при его перерезании на величину $3 \cdot V_{pez} \cdot d\tau$, с.

Сравнивая зависимости (12), получаем:

$$\tau_3 = \frac{c \cdot \rho}{2 \cdot \lambda} \cdot \left(\sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho} \cdot (d\tau + \tau_2) - V_{pez} \cdot d\tau} \right)^2 = d\tau \cdot \left(\sqrt{1 + \frac{\tau_2}{d\tau} - \alpha} \right)^2. \quad (13)$$

С учетом зависимости (10) имеем:

$$\tau_3 = d\tau \cdot \left\{ \sqrt{1 + \left[\sqrt{1 + (1 - \alpha)^2} - \alpha \right]^2} - \alpha \right\}^2. \quad (14)$$

Как видно, $\tau_3 > \tau_2 > \tau_1$. Соответственно параметр l_{2_3} определится так:

$$l_{2_3} = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho} \cdot d\tau} \cdot \left\{ \sqrt{1 + \left[\sqrt{1 + (1 - \alpha)^2} - \alpha \right]^2} - \alpha \right\}. \quad (15)$$

Сравнивая зависимости (15), (11) и (6), видим, что $l_{2_3} > l_{2_2} > l_{2_1}$. Следовательно, с увеличением числа шагов, равных $V_{pez} \cdot d\tau$, глубина проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали увеличивается. При последующем четвертом шаге теплового источника на величину $V_{pez} \cdot d\tau$ параметр l_{2_4} определится равенствами:

$$l_{2_4} = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho} \cdot (d\tau + \tau_3) - V_{pez} \cdot d\tau}; \quad l_{2_4} = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho} \cdot \tau_4}, \quad (16)$$

где τ_4 – время нагрева адиабатического стержня при его перерезании на величину $4 \cdot V_{pez} \cdot d\tau$, с.

Сравнивая зависимости (16), получаем:

$$\tau_4 = \frac{c \cdot \rho}{2 \cdot \lambda} \cdot \left(\sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho} \cdot (d\tau + \tau_3) - V_{pez} \cdot d\tau} \right)^2 = d\tau \cdot \left(\sqrt{1 + \frac{\tau_3}{d\tau} - \alpha} \right)^2. \quad (17)$$

Подставляя зависимость (14) в (16), имеем:

$$\tau_4 = d\tau \cdot \left\{ \sqrt{1 + \left[\sqrt{1 + \left[\sqrt{1 + (1 - \alpha)^2} - \alpha \right]^2} - \alpha \right]^2} - \alpha \right\}^2. \quad (18)$$

Из зависимостей (18), (14), (10) и (6) следует: $\tau_4 > \tau_3 > \tau_2 > \tau_1$. Подставляя зависимость (18) в (16), получаем:

$$l_{23} = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho}} \cdot d\tau \cdot \left\{ \sqrt{1 + \left[\sqrt{1 + \left[\sqrt{1 + (1 - \alpha)^2} - \alpha \right]^2} - \alpha \right]^2} - \alpha \right\}. \quad (19)$$

Аналогично можно определить значения l_{25}, \dots, l_{2n} . Однако, как видно, закон изменения l_2 с увеличением числа шагов n усложняется, и выразить его простой аналитической зависимостью трудно. Поэтому более просто определить l_2 с использованием численного расчета на основе зависимости (9), представив ее в виде:

$$\frac{\tau_n}{d\tau} = \left(\sqrt{1 + \frac{\tau_{n-1}}{d\tau}} - \alpha \right)^2, \quad (20)$$

где τ_n, τ_{n-1} – время нагрева адиабатического стержня при его перерезании соответственно на величины $n \cdot V_{рез} \cdot d\tau$ и $(n-1) \cdot V_{рез} \cdot d\tau$, с.

Безразмерная величина α может изменяться в пределах от 0...1.

Результаты расчетов. Для $\alpha = 0,2$ зависимость (20) принимает вид:

$$\frac{\tau_n}{d\tau} = \left(\sqrt{1 + \frac{\tau_{n-1}}{d\tau}} - 0,2 \right)^2. \quad (21)$$

Начальное значение $\tau_1/d\tau$ определяется из зависимости (5) и равно 0,64. Тогда, согласно зависимости (21), имеем $\tau_2/d\tau = 1,1677$. Подставляя в зависимость (21) данное значение, определяем $\tau_3/d\tau = 1,6187$, и так далее.

Очевидно, что параметр τ_n с увеличением числа шагов n непрерывно увеличивается, асимптотически приближаясь к определенному значению. Чтобы определить это значение, следует воспользоваться условием

$$l_{2n+1} = l_{2n} + V_{рез} \cdot d\tau, \quad (22)$$

рассматривая его в виде:

$$\sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho}} \cdot (d\tau + \tau_{n-1}) - \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho}} \cdot \tau_n = V_{рез} \cdot d\tau. \quad (23)$$

После умножения левой части уравнения (23) на сопряженную величину $\sqrt{(d\tau + \tau_{n-1})} - \sqrt{\tau_n}$, получаем:

$$\frac{d\tau + \tau_{n-1} - \tau_n}{(\sqrt{d\tau + \tau_{n-1}} + \sqrt{\tau_n})} = V_{рез} \cdot \sqrt{\frac{c \cdot \rho}{2 \cdot \lambda}} \cdot d\tau. \quad (24)$$

С учетом соотношений $\tau_n - \tau_{n-1} = d\tau_n$ и $d\tau + \tau_{n-1} \approx \tau_n$ зависимость (24) опишется так:

$$d\tau - d\tau_n = V_{рез} \cdot \sqrt{\frac{c \cdot \rho}{2 \cdot \lambda}} \cdot 2 \cdot \sqrt{\tau_n} \cdot d\tau. \quad (25)$$

В результате получено уравнение:

$$d\tau = \frac{d\tau_n}{\left(1 - 2 \cdot V_{рез} \cdot \sqrt{\frac{c \cdot \rho}{2 \cdot \lambda}} \cdot \tau_n \right)}. \quad (26)$$

Для установления зависимости τ_n от τ проинтегрируем правую и левую части уравнения (26):

$$\int d\tau = \int \frac{d\tau_n}{\left(1 - 2 \cdot V_{рез} \cdot \sqrt{\frac{c \cdot \rho}{2 \cdot \lambda}} \cdot \tau_n \right)} + C_1, \quad (27)$$

где C_1 – постоянная интегрирования, которая определяется из начального условия $\tau_n(\tau = 0) = 0$.

Интеграл в правой части уравнения преобразуем путём замены переменной $y = \sqrt{\tau_n}$. Тогда $\tau_n = y^2$;

$d\tau_n = 2 \cdot y \cdot dy$. Обозначая постоянную величину $2 \cdot V_{рез} \cdot \sqrt{\frac{c \cdot \rho}{2 \cdot \lambda}} = m$, имеем

$$\int \frac{d\tau_n}{\left(1 - 2 \cdot V_{рез} \cdot \sqrt{\frac{c \cdot \rho}{2 \cdot \lambda}} \cdot \tau_n \right)} = \int \frac{2 \cdot y \cdot dy}{m \cdot \left(\frac{1}{m} - y \right)} = -\frac{2}{m} \cdot \int \left(\frac{1}{m} - \frac{1}{m} - y \right) \cdot dy = -\frac{2}{m} \cdot \left[\sqrt{\tau_n} + \frac{1}{m} \cdot \ln \left(\frac{1}{m} - \sqrt{\tau_n} \right) \right]. \quad (28)$$

Подставляя зависимость (28) в уравнение (27), получаем:

$$\tau = -\frac{2}{m} \cdot \left[\sqrt{\tau_n} + \frac{1}{m} \cdot \ln \left(\frac{1}{m} - \sqrt{\tau_n} \right) \right] + C_1. \quad (29)$$

Постоянная интегрирования C_1 определяется из начального условия $\tau_n(\tau=0) = 0$:

$$C_1 = \frac{2}{m^2} \cdot \ln \frac{1}{m}. \quad (30)$$

Тогда уравнение (29) принимает вид:

$$\sqrt{\tau_n} = \frac{1}{m} \cdot \left(1 - e^{-\frac{m^2}{2} \tau - m \sqrt{\tau_n}} \right). \quad (31)$$

При $\tau_n = 0$ величина $\tau = 0$, то есть выполняется начальное условие, что свидетельствует о правильности полученного решения. Уравнение (31) сложно разрешить относительно неизвестной функции τ_n . Поэтому для установления зависимости τ_n от τ необходимо задавать значения τ_n и из уравнения (31) определять значения τ .

Как следует из уравнения (31), функция τ_n с увеличением переменной величины τ увеличивается по экспоненциальному закону, асимптотически приближаясь к определенной постоянной (максимальной) величине. Для ее определения уравнение (31) необходимо подчинить условию $\tau \rightarrow \infty$. В результате получаем:

$$e^{-\frac{m^2}{2} \tau - m \sqrt{\tau_n}} \rightarrow 0. \quad (32)$$

Тогда, исходя из уравнения (31), имеем:

$$\tau_n = \frac{1}{m^2} = \frac{\lambda}{2 \cdot c \cdot \rho \cdot V_{pez}^2}; \quad (33)$$

$$l_{2n} = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho} \cdot \tau_n} = \frac{\lambda}{c \cdot \rho \cdot V_{pez}}. \quad (34)$$

Зная максимальное значение τ_n , определяемое зависимостью (33), и уменьшая его до нуля, по преобразованному уравнению (31):

$$\left(1 - m \cdot \sqrt{\tau_n} \right) \cdot e^{m \cdot \sqrt{\tau_n}} = e^{\frac{m^2}{2} \tau} \quad (35)$$

несложно установить значения τ и соответственно зависимость τ_n от τ .

Перспективы дальнейших исследований. Авторы считают перспективными направления исследований, связанные с аналитическим определением температуры резания при шлифовании с учетом конечной глубины проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали при шлифовании. Это позволит научно обоснованно подойти к анализу тепловой напряженности процесса шлифовании и выбору оптимальных условий обработки с учетом ограничения по температуре резания.

Выводы. В работе предложено новое теоретическое решение задачи определения температуры резания и глубины проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали при шлифовании с учетом перерезания шлифовальным кругом адиабатических стержней, набором которых условно представлен снимаемый припуск. В результате установлено, что с течением времени обработки температура резания непрерывно увеличивается, асимптотически приближаясь к определенному значению, а глубина проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали при шлифовании, в отличие от известных теоретических решений, принимает конечное значение. Это приближает расчетную схему теплового процесса при шлифовании к реальным условиям шлифовании и позволяет научно обоснованно подойти к анализу тепловой напряженности процесса шлифовании и выбору оптимальных условий обработки с учетом ограничения по температуре резания.

Список литературы: 1. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифовании. – М.: Машиностроение, 1975. – 175 с. 2. Сипайлов В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности. – М.: Машиностроение, 1978. – 166 с. 3. Моделирование систем: монография / Г.А. Оборский, А.Ф. Даценко, А.В. Усов и др. – Одесса: Астропринт, 2013. – 664 с. 4. Теоретические основы резания и шлифовании материалов: учебное пособие / А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков и др. – Одесса: ОГПУ, 1999. – 450 с. 5. Новиков Ф.В., Яценко С.М. Повышение эффективности технологии финишной обработки деталей пар трения поршневых насосов // Труды 13-й Международной научно-технической конференции. Физические и компьютерные технологии. – Харьков: ХНПК «ФЭД», 2007. – С. 8 – 20. 6. Новиков Ф.В., Рябенков И.А. Расчет температуры шлифовании и глубины ее проникновения в поверхностный слой обрабатываемой детали // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2008. – №1/2 (31). – С. 9 – 12.

Bibliography (transliterated): 1. Jakimov, A. V. *Optimizacija processa shlifovaniya*. Moscow: Mashinostroenie, 1975. Print. 2. Sipajlov, V. A. *Teplovyje processy pri shlifovanii i upravlenie kachestvom poverhnosti*. Moscow: Mashinostroenie, 1978. Print. 3. Oborskiy, G. A., et al. *Modelirovanie sistem: monografija*. Odessa: Astroprint, 2013. Print. 4. Jakimov, A. V., et al. *Teoreticheskie osnovy rezaniya i shlifovaniya materialov: ucheb. posobie*. Odessa: OGPU, 1999. Print. 5. Novikov, F. V., and S. M. Jacenko. "Povyshenie effektivnosti tehnologii finishnoj obrabotki detalej par treniya porshnevnyh nasosov." *Trudy 13 Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii. Fizicheskie i komp'yuternye tehnologii*. Kharkov: KkNPK «FED», 2007. 8–20.

Print. 6 Novikov, F. V., and I. A. Rjabenkov. "Raschjot temperatury shlifovanija i glubiny ee proniknovenija v poverhnostnyj sloj obrabatyvaemoj detali." *Vostochno-evropejskij zhurnal передовых tehnologij*. No. 1/2 (31). 2008. 9–12. Print.

Поступила (received) 30.09.2015

Новіков Федір Васильович – доктор технічних наук, професор, Харківський національний економічний університет імені С. Кузнеця, м. Харків; тел.: (067) 68-90-342; e-mail: fokusnic1@rambler.ru.

Новиков Фёдор Васильевич – доктор технических наук, профессор, Харьковский национальный экономический университет имени С. Кузнеця, г. Харьков; тел.: (067) 68-90-342; e-mail: fokusnic1@rambler.ru.

Novikov Fedor Vasilevich – Doctor of Technical Sciences, Professor, S. Kuznets Kharkiv National University named of Economics, Kharkov; tel.: (067) 68-90-342; e-mail: fokusnic1@rambler.ru.

Кленов Олег Станіславович – кандидат технічних наук, Фірма «ДіМерус Інженерінг», м. Харків; тел.: (057) 757-87-77; e-mail: anna@dimerus.com

Кленов Олег Станіславович – кандидат технических наук, Фирма «ДиМерус Инженеринг», г. Харьков; тел.: (057) 757-87-77; e-mail: anna@dimerus.com

Klenov Oleg Stanislavovich – Candidate of Technical Sciences, Firm «DiMerus Engineering», Kharkov; tel.: (057) 757-87-77; e-mail: anna@dimerus.com

Гершиков Ілля Володимирович – директор, ЗАТ «Азовський машинобудівний завод», м. Бердянськ; тел.: (06153) 45-9-79; e-mail: direktor@amz.com.ua

Гершиков Илья Владимирович – директор, ЗАО «Азовский машиностроительный завод», г. Бердянск; тел.: (06153) 45-9-79; e-mail: direktor@amz.com.ua

Gershikov Ilya Vladimirovich – Director of JSC "Azov Machine Building Plant", Berdyansk; tel.: (06153) 45-9-79; e-mail: direktor@amz.com.ua

УДК 621.923

Ф. В. НОВИКОВ, Р. М. МИНЧЕВ

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ ОТВЕРСТИЙ

Произведен расчет шероховатости поверхности при абразивной обработке на основе использования теории вероятностей и выполнен анализ закономерностей изменения шероховатости поверхности при шлифовании отверстия. Установлено, что шероховатость поверхности однозначно определяется суммарным количеством зерен, участвующих в формировании шероховатости. Обоснованы преимущества хонингования по сравнению с внутренним шлифованием. Показана возможность уменьшения шероховатости поверхности при шлифовании кругом, ось которого расположена перпендикулярно оси вращения обрабатываемой детали.

Ключевые слова: абразивная обработка, шлифование, хонингование, отверстие, шероховатость поверхности.

Введение. При изготовлении гидро- и пневмоцилиндров предусмотрены высокие требования к точности и качеству обрабатываемых поверхностей отверстий. В особой мере это относится к обеспечению шероховатости поверхности ($R_a \leq 0,05$ мкм). Однако, как показывает практика, выполнить эти требования на операциях лезвийной обработки и внутреннего шлифования сложно. В связи с этим актуальна проблема определения новых более эффективных технологических решений, направленных на обеспечение заданной шероховатости обрабатываемых поверхностей отверстий в гидро- и пневмоцилиндрах, что требует проведения дальнейших исследований закономерностей изменения шероховатости поверхности при абразивной обработке, включая процессы внутреннего шлифования, хонингования и обработки отверстий свободным абразивом.

Анализ последних исследований. Многочисленными исследованиями [1 – 3] установлено, что добиться высоких показателей шероховатости обрабатываемых поверхностей отверстий можно применением *методов хонингования и обработки свободным абразивом*. Однако при этом значительно увеличивается трудоемкость обработки, например, по сравнению с внутренним шлифованием, что снижает эффективность обработки. Поэтому в настоящее время проводятся теоретические исследования параметров шероховатости поверхности при абразивной обработке с позиции теории вероятностей [4, 5] с целью научно обоснованного выбора оптимальных условий обработки. В связи с этим актуально применение данного теоретического подхода к определению оптимальных условий абразивной обработки отверстий с учетом высоких требований, предъявляемых к шероховатости обрабатываемых поверхностей.

Постановка задачи. В работе [6] предложено новое теоретическое решение задачи определения параметров шероховатости поверхности при абразивной обработке. Однако при этом недостаточно полно обоснована возможность перехода от биннома Ньютона к экспонентной функции при вычислениях. Поэтому необходимо, во-первых, уточнить данное решение, во-вторых, применить его для теоретического анализа условий уменьшения

© Ф. В. Новиков, Р. М. Минчев, 2015