

Ю. А. СИЗЫЙ, А. Н. УШАКОВ, С. Е. СЛИПЧЕНКО

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОПЕРАЦИИ ВРЕЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ, ОГРАНИЧЕННЫХ ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМОЙ КОНТАКТНОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ

В статье, принимая оптимальным по структуре двухступенчатый цикл круглого врезного наружного шлифования (КВНШ), показано влияние параметров этого цикла: скорости вращения заготовки S м/мин и скорости поперечной подачи V_p мм/мин, на глубину дефектного слоя H_d поверхности заготовки претерпевшей нагрев выше предельно допустимой температуры $T_{\text{пред}}^{\circ}\text{C}$. Последняя определена для закаленной стали 40X как верхнее значение температуры среднетемпературного отпуска в 490°C .

Расчет величины дефектного слоя H_d в зависимости от условий шлифования $H_d(V_p)$ выполняется с помощью формулы расчета температуры поверхности заготовки как функции расстояния x мм от поверхности в радиальном направлении и времени τ , сек, т.е. $T(\tau, x)$.

Для проектирования максимально производительного цикла КВНШ при ограничении нагрева поверхности детали не выше $T_{\text{пред}} = 490^{\circ}\text{C}$ применены формулы расчета величины припуска $\Pi(S_0, K_{\text{ш}})$ снимаемого при шлифовании в различные фазы цикла как функции подачи на оборот заготовки S_0 и $K_{\text{ш}}$ – обобщенной статической характеристики системы врезного шлифования.

Владея $T(\tau, x)$, $H_d(S_0)$ $\Pi(S_0, K_{\text{ш}})$ найдены условия наименьшего числа оборотов заготовки за операцию КВНШ обеспечивающие снятие необходимого припуска и нагрев поверхности детали не выше $T_{\text{пред}} = 490^{\circ}\text{C}$.

Ключевые слова: круглое врезное наружное шлифование, дефектный поверхностный слой, температура нагрева, оптимальные условия шлифования

Ю.А. СИЗИЙ, О.М. УШАКОВ, С.Е. СЛИПЧЕНКО

ПРОЕКТУВАННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ОПЕРАЦІЇ ВРІЗНОГО ШЛІФУВАННЯ, ОБМЕЖЕНИХ ГРАНИЧНОЮ ДОПУСТИМОЮ КОНТАКТНОЮ ТЕМПЕРАТУРОЮ

В статті, приймаючи оптимальним за структурою двосхідчатий цикл круглого врізного зовнішнього шліфування (КВЗШ), показано вплив параметрів цього циклу: швидкості обертання заготовки S м/хв і швидкості поперечної подачі V_p мм/хв, на глибину дефектного слою H_d поверхні заготовки що підлягла нагріву вище гранично припустимої температури $T_{\text{гран}}^{\circ}\text{C}$. Остання визначена для загартованої сталі 40X як верхнє значення температури середньотемпературного отпуска в 490°C .

Розрахунок величини дефектного слою H_d в залежності від умов шліфування $H_d(V_p)$ виконується за допомогою формули розрахунку температури поверхні заготовки як функції відстані x мм від поверхні у радіальному напрямку і часу τ , сек, тобто $T(\tau, x)$.

Для проектування максимально продуктивного циклу КВЗШ при обмеженні нагріву поверхні деталі не вище $T_{\text{гран}} = 490^{\circ}\text{C}$ застосовані формули розрахунку величини припуску $\Pi(S_0, K_{\text{ш}})$ що знімається при шліфуванні в різні фази циклу як функції подачі на оборот заготовки S_0 і $K_{\text{ш}}$ – узагальненої статичної характеристики системи врізного шліфування.

Володіючи $T(\tau, x)$, $H_d(S_0)$ $\Pi(S_0, K_{\text{ш}})$ знайдені умови найменшого числа обертів заготовки за операцію КВЗШ забезпечуючи зняття необхідного припуску і нагрів поверхні деталі не вище $T_{\text{гран}} = 490^{\circ}\text{C}$.

Ключові слова: кругле врізне зовнішнє шліфування, дефектний поверхневий шар, температура нагріву, оптимальні умови шліфування.

Yu. SIZYI, A. USHAKOV, S. SLIPCHENKO

DESIGN OF OPTIMAL PARAMETERS FOR THE GRINDING OPERATION LIMITED BY THE MAXIMUM PERMISSIBLE CONTACT TEMPERATURE

Influence parameters of two step cycle infeed grinding: speed rotation of blank S m/min and speed of V_p mm/min, on thickness defect layer is presented. Defect layer is a layer which are heated temperature over T_{pr} . This T_{pr} for hardening steel 40X is equal 490°C as a top temperature of medium-temperature tempering. Thickness defect layer $H_d(V_p)$ are calculated with helping calculation formula $T(\tau, x)$ temperature as a function of x , mm-distance from blank surface and team τ , s. For design maximum productivity cycle infeed grinding with limit heating layer of part over $T_{pr}=490^{\circ}\text{C}$ the formula $\Pi(S_0, K_{\text{ш}})$ which calculate removing layer in process of grinding in any phase of cycle as a function of feed per blank revolution S_0 and $K_{\text{ш}}$ - static characteristic system infeed grinding, are used. With helping $T(\tau, x)$, $H_d(S_0)$ $\Pi(S_0, K_{\text{ш}})$ the conditions of minimum number blank revolutions for removing necessary allowance and heating surface of part not over $T_{pr}=490^{\circ}\text{C}$ are found.

Keywords: Cylindrical infeed grinding, surface defect layer, reheat temperature, optimality conditions grinding.

Обзор литературы. При исследовании теплофизики шлифования в основном применяются два подхода, когда за источник нагрева заготовки принимают: 1) сплошную поверхность контакта круга с заготовкой; 2) суммарное тепловое воздействие при резании единичными абразивными зёрнами.

Наиболее глубоко разработан первый подход и ему посвящены работы [3,4,5,6]. Второй подход использован в работах [7,8,9,10,11,12]. Теплофизика шлифования нашла отражение также в работах [13,14,15].

Кроме перечисленных работ, в которых используются два основных подхода к описанию теплофизики резания и шлифования, встречаются и оригинальные подходы. Так в работах [16,17]

обрабатываемая поверхность представляется как набор адиабатических стержней, что позволяет авторам решать задачу теплового баланса и повышения качества поверхности по температурному критерию.

В настоящей работе применяется первый подход, который достаточно полно разработан в работе [5], но в отличии от неё, где источник тепла это плоскость, движущаяся по поверхности полупространства, заменен на быстро движущийся. Возможность такой замены доказано, анализом критерия Пекле [8]:

$$P_e = \frac{V_z \cdot L}{a} \leq 8 \div 10, \text{ где } L - \text{размер источника тепла в}$$

направлении его движения; a - температуропроводность материала заготовки.

Применение понятия «быстро движущегося»

источника тепла» позволило получить зависимость $T(\tau, x)$ [18] интегрированием по времени, т.е. с учетом пребывания поверхности заготовки в источнике тепла и вне его. Это в свою очередь позволило учесть различную теплоотдачу от поверхности заготовки при пребывании её в зоне контакта и вне её.

В настоящей работе при оптимизации параметров цикла КВНШ производится расчет припуска снимаемого на каждом обороте заготовки на основе формул полученных в [18], в которых используется так называемая «обобщенная статическая характеристика процесса шлифования» - $K_{ш} = \frac{C_e}{j + C_p}$, где C_p -

жесткость процесса шлифования; j - жесткость системы «заготовка-абразивный круг станок». Жесткость j определяется экспериментально, как это показано в [18], а C_p определяется на основе экспериментальной формулы расчёта P_z от условий шлифования с переходом к P_y - радиальной составляющей силы шлифования и линеаризацией её относительно глубины шлифования h т.е. получения зависимости $P_y = C_p \cdot h$.

3. Методы решения задачи определения оптимальных параметров цикла КВНШ.

Методика определения оптимальных параметров цикла КВНШ основана на имитационном моделировании динамики КВНШ представленного трехмассовой моделью круглошлифовального станка 3М151. На её основе получены формулы расчета припуска снятого при шлифовании на каждой фазе цикла с использованием экспериментальной зависимости силы шлифования P_z от условий шлифования (режимов, характеристики круга, условий правки) и обобщенной статической характеристики КВНШ.

Величина припуска необходимого для снятия, т.е. величина дефектного поверхностного слоя заготовки, определяется на основе аналитически полученной зависимости $T(\tau, x)$ для быстро движущегося источника тепла с программированием пределов интегрирования по времени, что позволяет учесть различную интенсивность теплоотдачи от заготовки в зоне контакта её с кругом и вне её.

4. Результаты исследования и их обсуждение

Исследование операции КВНШ выполнено применительно для шлифования цилиндрической поверхности $\varnothing 100f7 \begin{pmatrix} -0,036 \\ -0,071 \end{pmatrix}$ длиной вдоль оси $B=40$ мм.

В работе сравниваются по производительности оптимальные двухступенчатые циклы КВНШ с окружными скоростями вращения заготовки $S=35$ м/мин и $S=100$ м/мин.

Оптимальным циклом КВНШ принимается цикл обеспечивающий нагрев детали не выше $T_{пред}=490^\circ$ и минимальное при этом число оборотов заготовки.

Нагрев шлифуемой заготовки $T(\tau, x)$, как функция x - расстояния от поверхности в радиальном направлении и τ - времени отсчитываемого от момента

входа поверхности заготовки в зону контакта с кругом [18] рассчитывается по формуле:

$$T(\tau, x) = \frac{q \cdot \sqrt{a}}{\lambda \cdot \sqrt{\pi}} \int_0^{\tau} \frac{\exp\left(-\frac{x^2}{4 \cdot a \cdot (\tau - t)}\right)}{\sqrt{\tau - t}} \left[1 - \frac{\text{erf}\left[\frac{x}{\sqrt{4 \cdot a \cdot (\tau - t)}} + \frac{\text{if}\left[\tau \leq \tau_1, \alpha_1, \alpha\left(1 - \frac{\tau}{\tau_2}\right)\right]}{\lambda} \cdot \sqrt{a \cdot (\tau - t)}\right]}{\sqrt{4 \cdot a \cdot (\tau - t)}} + \frac{\text{if}\left[\tau \leq \tau_1, \alpha_1, \alpha\left(1 - \frac{\tau}{\tau_2}\right)\right]}{\lambda} \cdot \sqrt{a \cdot (\tau - t)}\right]^2 dt \quad (1)$$

где $q = \frac{P_z \cdot V_k}{L \cdot B} \cdot \beta$ - плотность теплового потока,

$\frac{\text{Дж}}{\text{см}^2 \cdot \text{сек}}$; P_z - окружная сила шлифования, Н; V_k -

окружная скорость шлифовального круга, м/с; a - коэффициент температуропроводности, $\frac{\text{мм}^2}{\text{сек}}$; λ - коэффициент теплопроводности, $\frac{\text{Дж}}{\text{мм} \cdot \text{сек} \cdot \text{град}}$; τ -

время наблюдения за температурой; $(\tau - t)$ - время распространения тепла от момента t возникновения теплового импульса до τ - времени наблюдения; τ_1 - время действия источника тепла, сек; τ_2 - время оборота заготовки, сек; α_1 - коэффициент теплоотдачи в источнике тепла, $\frac{\text{Дж}}{\text{мм}^2 \cdot \text{сек} \cdot \text{град}}$; α - коэффициент

теплоотдачи вне источника тепла; if - условный оператор «если», при помощи которого программируется решение задачи определения $T(\tau, x)$ в источнике тепла и вне его.

Окружная сила шлифования P_z вычисляется по экспериментальной зависимости [18]:

$$P_z = 2,254 \frac{\sigma_t^{0,342} \cdot H^{0,258} \cdot V_p^{0,945} \cdot B}{Z^{0,051} \cdot S^{0,073} \cdot S_{pr}^{0,073} \cdot t_{pr}^{0,026}}, \text{ Н} \quad (2)$$

где σ_t - предел прочности материала заготовки при температуре 600°C ; Н - показания прибора «Звук - 202» (частота собственных колебаний кГц, ГОСТ 25961-83); Z - зернистость; V_p - скорость врезной подачи, мм/мин; S - окружная скорость вращения заготовки, м/мин; S_{pr} - продольная скорость правки алмазным карандашом, мм/мин; t_{pr} - глубина правки, мм.

Длина дуги контакта L вычисляется по формуле [13, 10]:

$$L = \sqrt{D_e \cdot h}, \quad (3)$$

где $D_e = \frac{D_k}{1 + \frac{D_k}{d_z}}$ - эффективный диаметр круга; D

- диаметр круга; d_z - диаметр заготовки; h - глубина шлифования (поперечная подача на оборот заготовки), мм.

Доля тепла выделяемого при шлифовании поступающая в заготовку учитывается коэффициентом ввода β [5, 18]:

$$\beta = \frac{1}{1 + h \sqrt{\frac{4 \cdot V_z \cdot 10^3}{60 \cdot L \cdot a \cdot \pi}}}, \quad (4)$$

Время действия источника тепла τ_1 , и время оборота заготовки τ_2 вычисляются по:

$$\tau_1 = \frac{L \cdot 60}{V_z \cdot 100}; \tau_2 = \frac{\pi \cdot d_z \cdot 60}{V_z \cdot 100}.$$

Для вычисления силы P_z по (2) принимаем, что шлифование выполняется кругом 24A16НСМ1К. Поэтому для твердости круга СМ1 показания прибора «Звук-202» $H=1,38$.

Шлифуется закаленная сталь 40Х и поэтому $\sigma_B=22$ кгс/мм² зернистость выбранного круга $z=16$. Режимы правки: $S_{pr}=150$ мм/мин, $t_{pr}=0,01$ мм. Значения коэффициентов $\alpha_1=0$, $\alpha_2=0,017$; $\frac{Дж}{мм^2 \cdot сек \cdot град}$, что соответствует охлаждению заготовки поливом жидкостью на водной основе [8].

Теплоотдача в зоне контакта, учитываемая коэффициентом α крайне мала в связи с тем, что охлаждающая жидкость практически не поступает в зону контакта и поэтому α_1 , можно принять равным нулю.

Значения a и λ для стали 40Х следующие [8]: $a=6,7$ мм²/с; $\lambda=0,0339$ Дж/мм·сек·град. Таким образом имеются все данные для расчета $T(\tau, x)$, а значит для расчета величины дефектного слоя заготовки, т.е. слоя нагретого выше 490°. Изменяя V_p в (1) и перебирая x можно найти такое его значение x_i , для которого максимальное значение $T(\tau, x_i)$ будет равно 490°.

На рис. 1 приведен пример выбора V_p , обозначенной как $V_{поп}$, обеспечивающей

$\sigma_b := 22$ $H_{11} := 1.38$ $V_{non} := 1.1$ $Z := 16$ $V_z := 100$ $S_{pr} := 150$ $t_{pr} := 0.01$
 $D_k := 750$ $d_z := 100$ $V_k := 50$ $a := 6.7$ $\lambda := 0.0339$ $B := 40$
 $P_z := \frac{2.254 \cdot \sigma_b^{0.342} \cdot H^{0.258} \cdot V_{non}^{0.945} \cdot B}{Z^{0.051} \cdot V_z^{0.073} \cdot S_{pr}^{0.073} \cdot t_{pr}^{0.026}}$ $P_z := 149.645$ $De := \frac{D_k}{1 + \frac{D_k}{d_z}}$ $De := 88.235$
 $h := \frac{\pi \cdot d_z \cdot V_{non}}{V_z \cdot 1000}$ $h := 3.456 \times 10^{-3}$ $L_{\text{eff}} := \sqrt{De \cdot h}$ $L := 0.552$
 $c_{\text{eff}} := h \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot V_z \cdot 1000}{60 \cdot L \cdot a \cdot \pi}}$ $\beta := \frac{1}{1 + c}$ $q := \frac{P_z \cdot V_k}{L \cdot B} \cdot \beta$ $q := 312.857$ $N_{\text{eff}} := \frac{P_z \cdot V_z}{60}$ $N_{\text{eff}} := 249.40$
 $\tau_1 := \frac{L \cdot 60}{V_z \cdot 1000}$ $\tau_1 := 3.313 \times 10^{-4}$ $\tau_2 := \frac{\pi \cdot d_z \cdot 60}{V_z \cdot 1000}$ $\tau_2 := 0.188$ $\Delta \tau := 0.000025$
 $N_{\text{eff}} := 500$ $i := 0..N$ $\tau_i := 0 + i \cdot \Delta \tau$ $j := 0..200$ $x_j := 0 + 0.001 \cdot j$ $\alpha_1 := 0$ $\alpha_2 := 0.017$

$$T(\tau, x) = \frac{q \cdot \sqrt{a}}{\lambda \cdot \sqrt{\pi}} \int_0^{\text{if}(\tau < \tau_1, \tau, \tau_1)} \frac{e^{-\frac{x^2}{4 \cdot a \cdot (\tau-t)}}}{\sqrt{\tau-t}} \left[1 - \frac{\text{if}(\tau \leq \tau_1, \alpha_1, \alpha_2 \left(1 - \frac{\tau}{\tau_2}\right))}{\lambda} \sqrt{a \cdot (\tau-t)} \right] dt$$

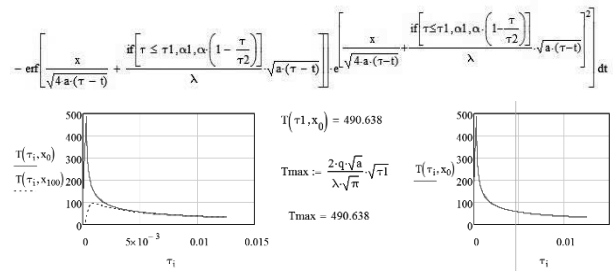


Рис. 1 – Определение скорости чистой поперечной подачи из условия $T_{\max}=490^\circ\text{C}$

максимальную температуру на поверхности, т.е. для $x=0$, равную предельно допустимой $T_{np}=490^\circ$.

Так для $S=100$ мм/мин вектору дискретных значений $V_p = (1.1, 1.5, 2.3, 4.4, 5)^T$ получен соответственно вектор глубины дефектного слоя H_d , т.е. слоя нагретого выше 490°, $H_p = (0, 0.001, 0.021, 0.039, 0.053, 0.06)^T$

Зависимость $H_d(V_p)$ аппроксимируем полиномом 2^{ой} степени, как это делается при планировании экспериментов.

$$X = \begin{pmatrix} 1 & 1.1 & 1.1^2 \\ 1 & 1.5 & 1.5^2 \\ 1 & 2 & 2^2 \\ 1 & 3 & 3^2 \\ 1 & 4 & 4^2 \\ 1 & 4.5 & 4.5^2 \end{pmatrix} \quad Y = \begin{pmatrix} 0 \\ 0.001 \\ 0.021 \\ 0.039 \\ 0.053 \\ 0.06 \end{pmatrix} \quad B = (X^T X)^{-1} (X^T Y) \quad B = \begin{pmatrix} -0.034 \\ 0.031 \\ -2.143 \times 10^{-3} \end{pmatrix}$$

$$V_{pop} = X \cdot B = \begin{pmatrix} -3.062 \times 10^{-3} \\ 6.911 \times 10^{-3} \\ 0.018 \\ 0.038 \\ 0.054 \\ 0.06 \end{pmatrix} \quad Y = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \times 10^{-3} \\ 0.021 \\ 0.039 \\ 0.053 \\ 0.06 \end{pmatrix}$$

$V_{pop} = 0.6, 0.601, 4.5$ $H_d(V_{pop}) := -0.034 + 0.031 \cdot V_{pop} - 2.143 \cdot 10^{-3} \cdot V_{pop}^2$

$$X1 = \begin{pmatrix} 1 & 0.67 & 0.67^2 \\ 1 & 1 & 1^2 \\ 1 & 2 & 2^2 \\ 1 & 3 & 3^2 \\ 1 & 4 & 4^2 \\ 1 & 4.5 & 4.5^2 \end{pmatrix} \quad Y2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0.029 \\ 0.081 \\ 0.123 \\ 0.160 \\ 0.175 \end{pmatrix} \quad B1 = (X1^T X1)^{-1} (X1^T Y2) \quad B1 = \begin{pmatrix} -0.041 \\ 0.071 \\ -5.122 \times 10^{-3} \end{pmatrix}$$

$$Y3 := X1 \cdot B1 = \begin{pmatrix} 3.872 \times 10^{-3} \\ 0.024 \\ 0.08 \\ 0.125 \\ 0.16 \\ 0.174 \end{pmatrix} \quad Y2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0.029 \\ 0.081 \\ 0.123 \\ 0.16 \\ 0.175 \end{pmatrix}$$

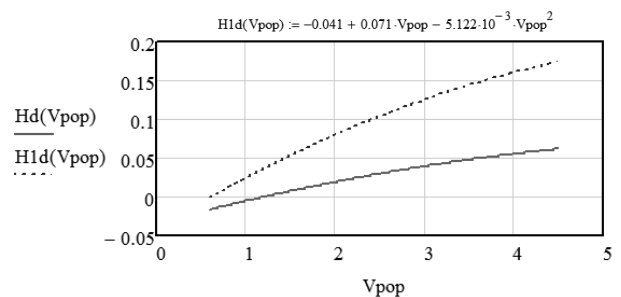


Рис. 2 – Аппроксимация зависимостей $H_d(V_p)$ при $S=35$ м/мин и $S=100$ м/мин и их сравнение

Вектор V_p представляем матрицей X условий эксперимента, а вектор H_p представляем вектором H_d результатов эксперимента, и по формуле

$B=(X^T \cdot X)^{-1} \cdot (X^T \cdot Y)$ вычисляем коэффициенты полинома второй степени. Вектор Y сравнивается с вектором $Y1$ - расчетный по модели значений H_p . Из этого сравнения видно, что полученное уравнение модели хорошо описывает зависимость $H_d(V_p)$. Процедура получения $H_d(V_p)$ показана на рис. 2. На этом же рис.2 выполнено получением зависимости $H_p(V_p)$ при $S=35$ м/мин. Полученная зависимость это полином $H_{1d}(V_p)$. Здесь же на рис. 2 приведено их графическое сравнение, из которого видно, что глубина дефектного слоя при $S=100$ м/мин. значительно меньше, чем при $S=35$ м/мин при варьировании V_p в диапазоне возможных его значений на станке 3М151.

Для расчета числа оборотов на фазах чернового и чистового шлифования необходимо пользоваться следующими формулами расчета снимаемого припуска на радиус заготовки [18]:

- для шлифования на черновой подаче S_{10}

$$\Pi = \sum_{i=1}^{n_2} [S_{10}(1 - K_{iu}^i)]; \quad (5)$$

- для шлифования на чистовой подаче S_0

$$\Pi_1 = \sum_{i=1}^{n_1} [S_0(1 - K_{iu}^i) + S_{10} \cdot K_{iu}^i]. \quad (6)$$

В этих формулах n_1 и n_2 число оборотов заготовки на фазе чистового и чернового шлифования соответственно.

Поскольку в формулах (5) и (6) припуск является функцией S_0 , S_{10} , то необходимо иметь формулы расчета глубины дефектного слоя H_d в функции поперечной подачи на оборот.

Для этого в векторах V_{pop} сделан переход к $S_0 = V_p \cdot \frac{\pi \cdot d_z}{V \cdot 100}$, а затем аналогично, как и при

получении зависимостей $H_d(V_p)$ получены зависимости $H_{d1}(S_0)$ для $S=100$ м/мин и $H_{d2}(S_0)$ для $S=35$ м/мин. Все необходимые результаты расчетов приведены на рис.3.

Из рис.3 видно, что $H_{d1}(S_0)$ и $H_{d2}(S_0)$ мало отличаются друг от друга однако, учитывая что время оборота заготовки при $S=100$ м/мин почти в три раза меньше времени оборота ее при $S=35$ м/мин, следует ожидать производительность двухступенчатого цикла врезного шлифования при оптимальных сочетаниях S_0 и S_{01} будет при $S=100$ м/мин значительно выше чем при $S=35$ м/мин.

В формулах расчета снимаемого припуска Π (5) и (6) присутствует важнейший параметр системы врезного шлифования

$$K_{iu} = \frac{C_p}{j + C_p}, \quad (7)$$

где C_p - жесткость процесса шлифования Н/м; j - жесткость системы «заготовка-шлифовальный круг-станок», Н/м.

C_p является коэффициентом пропорциональности в зависимости $P_y = C_p \cdot h$, где P_y - радиальная составляющая силы шлифования, H ; h - глубина шлифования или поперечная подача на оборот заготовки S_0 .

$$V_{pop} := (1.1 \ 1.5 \ 2 \ 3 \ 4 \ 4.5)^T \quad Hd := (0 \ 0.001 \ 0.021 \ 0.039 \ 0.053 \ 0.06)^T \quad dz := 100$$

$$Vz := 100 \quad So := 4.5 \cdot \frac{\pi \cdot dz}{Vz \cdot 1000} = 0.014$$

$$X := \begin{pmatrix} 1 & 0.003456 & 0.003456^2 \\ 1 & 0.004712 & 0.004712^2 \\ 1 & 0.006283 & 0.006283^2 \\ 1 & 0.009425 & 0.009425^2 \\ 1 & 0.013 & 0.013^2 \\ 1 & 0.014 & 0.013^2 \end{pmatrix} \quad Y := \begin{pmatrix} 0 \\ 0.001 \\ 0.021 \\ 0.039 \\ 0.053 \\ 0.06 \end{pmatrix} \quad B := (X^T \cdot X)^{-1} \cdot (X^T \cdot Y) \quad B = \begin{pmatrix} -0.033 \\ 9.732 \\ -243.143 \end{pmatrix}$$

$$Y1 := X \cdot B$$

$$Y1^T = (-2.511 \times 10^{-3} \ 7.218 \times 10^{-3} \ 0.018 \ 0.037 \ 0.052 \ 0.062)$$

а) Коэффициенты B в зависимости Hd(So) при Vz=100

$$V_{pop} := (0.67 \ 1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 4.5)^T \quad Hd := (0 \ 0.029 \ 0.081 \ 0.123 \ 0.16 \ 0.175)^T \quad Vz := 35$$

$$So := 4.5 \cdot \frac{\pi \cdot dz}{Vz \cdot 1000} = 0.04$$

$$X2 := \begin{pmatrix} 1 & 0.006014 & 0.006014^2 \\ 1 & 0.008976 & 0.008976^2 \\ 1 & 0.018 & 0.018^2 \\ 1 & 0.027 & 0.027^2 \\ 1 & 0.036 & 0.036^2 \\ 1 & 0.04 & 0.04^2 \end{pmatrix} \quad Y3 := \begin{pmatrix} 0 \\ 0.029 \\ 0.081 \\ 0.123 \\ 0.160 \\ 0.175 \end{pmatrix} \quad B2 := (X2^T \cdot X2)^{-1} \cdot (X2^T \cdot Y3)$$

$$B2 = \begin{pmatrix} -0.041 \\ 7.784 \\ -60.725 \end{pmatrix}$$

$$Y4 := X2 \cdot B2 \quad Y4^T = (4.005 \times 10^{-3} \ 0.024 \ 0.08 \ 0.125 \ 0.161 \ 0.174)$$

б) Коэффициенты в зависимости Hd(So) при Vz=35

$$So := 0.003, 0.0031, 0.02 \quad Hd1(So) := -0.033 + 9.732 \cdot So - 243.143 \cdot So^2$$

$$Hd2(So) := -0.041 + 7.784 \cdot So - 60.725 \cdot So^2$$

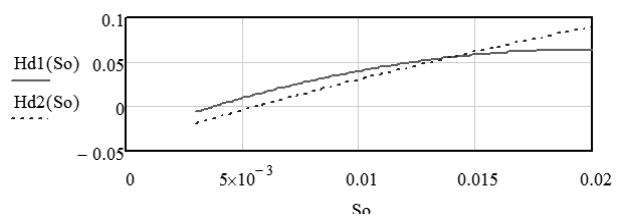


Рис. 3 – Аппроксимация зависимостей глубины дефектного слоя от подачи на оборот заготовки S_0 при $S=35$ м/мин и $S=100$ м/мин

$$j := 3.17 \cdot 10^7 \quad G_c := 10 \cdot 10^7 \quad k := \frac{c}{j + c} \quad k = 0.759 \quad Vz := 100 \quad dz := 100$$

$$\Pi := 0.2 \quad So := 0.0035 \quad S_{10} := 0.012 \quad Hd := -0.033 + 9.732 \cdot S_{10} - 243.143 \cdot S_{10}^2$$

$$V_{pop} := \frac{S_{10} \cdot Vz \cdot 1000}{\pi \cdot dz} \quad V_{pop} = 3.82 \quad Gt := 22 \quad H_{max} := 1.38 \quad Z := 16 \quad Spr := 150$$

$$B := 40 \quad tpr := 0.01$$

$$Pz := 2.254 \cdot \frac{Gt^{0.342} \cdot H^{0.258} \cdot V_{pop}^{0.945}}{Z^{0.051} \cdot Vz^{0.073} \cdot Spr^{0.073} \cdot tpr^{0.026}} \cdot B \quad Pz = 485.251 \quad N_{max} := \frac{Pz \cdot Vz}{60} = 808.751$$

$$Hd = 0.049 \quad n1 := 8 \quad \Pi1 := \sum_{i=1}^{n1} [So \cdot (1 - k^i) + S_{10} \cdot k^i] \quad \Pi1 = 0.052$$

$$\Pi2 := \Pi - \Pi1 = 0.148 \quad n2 := 16 \quad \Pi3 := \sum_{i=1}^{n2} [S_{10} \cdot (1 - k^i)] \quad \Pi3 = 0.155$$

$$n := n1 + n2 = 24$$

$$To := \frac{\pi \cdot dz \cdot 60}{Vz \cdot 1000} \cdot n \quad To = 4.524$$

Рис. 4 – Выбор оптимального значения черновой подачи S_{10} для цикла КВНШ при $S=V_z=100$ м/мин

Принимая, что $P_y \cong 2,5P_z$ и перейдя в (2) от V_p к

h по формуле $V_p = \frac{h \cdot 1000 \cdot S}{\pi \cdot d}$ получим

$$P_y = 1,306 \cdot 10^3 \cdot \frac{\sigma_t^{0.342} \cdot H^{0.258} \cdot S^{0.872} \cdot B}{Z^{0.051} \cdot S_{Pr}^{0.073} \cdot t_{Pr}^{0.026} \cdot d^{0.945}} \cdot h^{0.945} \quad (8)$$

Зависимость (8) следует линеаризовать относительно h , т.е. заменить $h^{0,945}$ на $C \cdot h$, что выполнено методом наименьших квадратов в диапазоне варьирования $h = (0,001 - 0,02)$ мм и получено $C = 1,262$.

Кроме этого надо учесть, что в модели динамической системы КВНШ на станке 3М151 [18] глубина шлифования имеет размерность метры, то выражение (8) преобразуется в:

$$P_y = 1,306 \cdot 10^3 \frac{\sigma_t^{0,342} \cdot H^{0,258} \cdot S^{0,872} \cdot B}{Z^{0,051} \cdot S_{Pr}^{0,073} \cdot t_{Pr}^{0,026} \cdot d_z^{0,945}} \cdot 1,262 \cdot 1000 \cdot h$$

Следовательно

$$C_p = 1,642 \cdot 10^6 \frac{\sigma_t^{0,342} \cdot H^{0,258} \cdot S^{0,872} \cdot B}{Z^{0,051} \cdot S_{Pr}^{0,073} \cdot t_{Pr}^{0,026} \cdot d_z^{0,945}} \quad (9)$$

и для $S = 100$ м/мин и принятых выше прочих параметрах выражения (9) получим $C_p = 9,999 \cdot 10^7$

Н/м, а при $S = 35$ м/мин $C_p = 4 \cdot 10^7$ Н/м.

Жесткость j необходимая для расчета $K_{ш}$ получена экспериментально [18] и равна $3,17 \cdot 10^7$ Н/м. Следовательно:

$K_{ш} = 0,759$ для $S = 100$ м/мин и $K_{ш} = 0,557$ для $S = 35$ м/мин.

Расчет максимального числа оборотов заготовки необходимого для снятия припуска П на операцию КВНШ с удалением дефектного слоя образуемого на шлифовании с черновой подачей S_{10} , производится следующим образом:

1 – выбирается S_{10} ;

2 – вычисляется глубина дефектного слоя H_d ;

3 – из (6) находят подбором n_1 таким, чтобы припуск П₁ снимаемый на чистовой подаче S_0 был равен H_d ;

4 – припуск на черновой подаче предшествующей чистовой будет равен П–П₁ и пользуясь (5) находим n_2 необходимое для его удаления;

5 – суммарное минимальное число оборотов $n = n_1 + n_2$ и определяет оптимум операции шлифования.

На рис. 4 показан расчет n_1 и n_2 при S обозначенной как $V_z = 100$ м/мин. Припуск П согласно его расчетно-аналитического определения [19] равен 0,2 мм на радиус. Чистовая подача на оборот S_0 определена и равна 0,0035 мм. Формула расчета получена (см. рис.3)

$$H_d = -0,033 + 9,732 \cdot S_{10} - 43,143 \cdot S_{10}^2.$$

На рис. 4 расчет приведен для $S_{10} = 0,012$ мм, что соответствует третьему шагу выбора S_{10} согласно табл. 1.

Таблица 1 – Выбор оптимального значения S_{10} при $V_z = 100$ м/мин.

№ шага выбора	S_{10} , мм	V_p , мм/мин	H_d , мм	n_1	n_2	n	P_z , Н	N , Ватт
1	0,007	2,23	0,023	5	28	33	291	485
2	0,01	3,183	0,041	7	19	26	408	680
3	0,012	3,82	0,05	8	16	24	485	808
4	0,013	4,138	0,055	8	14	22	523	872

Оптимальное значение S_{10} соответствует третьему шагу его назначения. Четвертый шаг при $S_{10} = 0,013$ обеспечивает более высокую производительность, но мощность N затрачиваемая приводом вращения заготовки равная 872 Вт больше номинальной, что недопустимо.

Таким образом, задав $v_p = 3,82$ мм/мин, $S = 100$ м/мин при реализации двухступенчатого цикла врезного шлифования с ограничением на нагрев детали не выше 490° С получим основное время шлифования $T_0 = 4,572$ с.

Аналогичный поиск оптимальных условий врезного шлифования выполнен для $S = V_z = 35$ м/мин и результаты его сведены в табл. 2.

Таблица 2 – Выбор оптимального значения S_{10} при $V_z = 35$ м/мин.

№ шага выбора	S_{10} , мм	V_p , мм/мин	H_d , мм	n_1	n_2	n	P_z , Н	N , Ватт
1	0,01	1,114	0,031	5	18	24	163,5	95
2	0,015	1,671	0,062	9	11	20	239,8	139,9
3	0,02	2,228	0,09	12	7	19	314,8	183,6
4	0,025	2,785	0,116	16	5	21	388,7	226

Из табл.2 видно, что оптимальные условия шлифования с $S = V_z = 35$ м/мин соответствуют $S_{10} = 0,02$ мм/об или $V_p = 2,228$ мм/мин. При этом основное время операции $T_0 = 10,233$ с. Таким образом шлифование с высокой скоростью вращения заготовки $S = 100$ м/мин по сравнению со шлифованием с рекомендуемой $S = 35$ м/мин [20] обеспечивает производительность в 2 раза более высокую при ограничении на нагрев детали не более 490° С.

Высокая скорость вращения заготовки при КВНШ не только обеспечивает повышение производительности обработки при ограничении её предельно допустимой температурной T_{max} нагрева шлифованной поверхности, но и меньшее значение подачи на оборот при этой температуре (см. значения в

первой строке вторых столбцов матриц X и X_2 на рис.3).

Так при $V_z=100$ м/мин $T_{\max} = 490^\circ\text{C}$ обеспечивается при $S_0=0,0035$ мм, а при $V_z=35$ м/мин при $S_0=0,006$ мм.

Известно, что именно уменьшение подачи на оборот (глубины шлифования), которое достигается например на фазе выхаживания при КНВШ, обеспечивает максимально малую шероховатость поверхности.

Поэтому КНВШ с высокой скоростью вращения заготовки предпочтительно при сравнении с шлифованием на меньшей скорости вращения заготовки и с точки зрения достижения малой шероховатости поверхности. КНВШ с меньшей подачей на оборот формирует также меньшую некруглость цилиндрической поверхности детали.

Таким образом все показатели качества обработки при КНВШ как физико-механические так и геометрические достигаются при большей производительности, если шлифование ведется при высокой скорости вращения заготовки.

В вышеприведенных исследованиях анализировалась обработка цилиндрической поверхности длиной вдоль оси равной 40 мм, в то время как на станке 3М151 применяются шлифовальные круги с высотой равной 80 мм. Такое ограничение длины поверхности порока миллиметрами связано с недостаточной мощностью привода вращения заготовки, номинальное значение которой для станка 3М151 равно 850 Вт. Для шлифования с высокой скоростью вращения заготовки, например равной 100 м/мин, поверхности длиной 80 мм требуется увеличение мощности привода примерно в два раза.

Выводы:

1. Показано, что высокая скорость вращения заготовки обеспечивает меньшую глубину дефектного слоя ее в зависимости от величины поперечной подачи V_p .

2. Применение цикла врезного шлифования с высокой S , например равной 100 м/мин, позволяет снизить основное время операции в 2 раза при бездефектной, по температурному критерию, обработке.

3. Все показатели качества обработки при КНВШ как физико-механические так и геометрические (шероховатость, некруглость) достигаются при более высокой производительности, если шлифование ведется при высокой скорости вращения заготовки.

Список литературы

1. Зубенко А. С., Колосков М. М., Каширинский Н. В. и др. *Марочник сталей* / ред. Зубенко А. С. Москва: Машиностроение, 2003. 784 с.
2. Арзамасов В. Н., Сидорин И. И., Косолапов Г. Ф. и др. *Материаловедение: Учебник для высших технических учебных заведений* / ред. Арзамасов В. Н. Москва: Машиностроение, 1986. 384 с.
3. Jaeger J. C. *Moving source of heat and temperature at sliding contact* Jaeger J. C. Proceeding the Royal Society of NSW. 1942. № 76. pp. 203-224.
4. Г. Карслоу. *Теплопроводность твердых тел*. Москва: Наука, 1964.

- 488 с.
5. Сипайлов В. А. *Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности*. Москва: Машиностроение, 1978. 167 с.
6. Якимов А. В. Ткаченко В. О. Зимин С. Г. и др. *Тепловые процессы при обычном и прерывистом шлифовании: учеб. пособие*. Одесса: ОГПУ, 1998. 274 с.
7. Корчак С. Н. *Прогрессивная технология и автоматизация круглого шлифования*. Москва: Машиностроение, 1968. 108 с.
8. Резников А. Н. *Теплофизика резания*. Москва: Машиностроение, 1969. 287 с.
9. Редько С. Г. *Процессы теплообразования при шлифовании металлов*. Саратов: Изд-во Саратовского университета, 1962. 231 с.
10. Островский В. И. *Теоретические основы процесса шлифования*. Ленинград: Изд-во Ленинградского университета, 1981. 140 с.
11. Бишутин С. Г. *Обеспечение требуемой совокупности параметров качества поверхностных слоев детали при шлифовании*. Москва: Машиностроение, 2004. 144 с.
12. Бишутин С. Г., Тюльпанов Н. В. *Прогнозирование тепловыделения в контактной зоне заготовки и шлифовального круга с учетом его изнашивания*. *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2007. №2 (14). С. 4-9.
13. Маслов Е. Н. *Теория шлифования материалов*. Москва: Машиностроение, 1974. 319 с.
14. Лурье Г. Б. *Шлифование металлов*. Москва: Машиностроение, 1969. 172 с.
15. Филимонов Л. Н. *Высокоскоростное шлифование*. Ленинград: Машиностроение, 1979. 246 с.
16. Новиков Ф. В. *Математическая модель определения температуры шлифования на основе учета баланса тепла, уходящего в образующиеся стружки и обрабатываемую деталь*. *Вісник Національного Технічного Університету сільськогосподарства ім. П. Василенка*. 2007. Вип. 61. С. 22-33.
17. Новиков Ф. В., Рябенков И. А. *Теоретический анализ условий повышения качества обработки по температурному критерию*. *Вісник Національного Технічного Університету сільськогосподарства ім. П. Василенка*. 2007. Вип. 61. С. 164-171.
18. Сизый Ю. А., Сталинский Д. В. *Динамика и теплофизика шлифования*. Харьков: ГП «УкрНТЦ Энергосталь», 2016. 448 с.
19. *Справочник технолога-машиностроителя*. В двух томах / под редакцией Косиловой А. Г., Мещерякова Р. К. Москва: Машиностроение, 1985. Т 1. 655 с.
20. *Справочник технолога-машиностроителя*. В двух томах / под редакцией Косиловой А. Г., Мещерякова Р. К. Москва: Машиностроение, 1985. Т 2. 491 с.

References (transliterated)

1. Zubenko A. S., Koloskov M. M., Kashirinskiy N. V. *Marochnik staley* [Steel quality] Moscow, Machine building Publ., 2003. 784 p.
2. Arzamasov V. N., Sidorin I. I., Kosolapov G. F. *Materialovedenie: Uchebnik dlya vysshnykh tekhnicheskikh uchebnykh zavedeniy* [Materials authority: Text-book for Higher Technical Education Schools] Moscow, Machine building Publ., 1986. 384 p.
3. Jaeger J. C. *Moving source of heat and temperature at sliding contact* Jaeger J. C. Proceeding the Royal Society of NSW. 1942. no 76. pp. 203-224.
4. Carslow G. S., Jaeger J. C. *Conduction of heat in solids*. Oxford, Uk. University Press, 1959. (Rus. ed.: Carslow G. S., Jaeger J. C., ed. *Teploprovodnost' tverdyh tel*. Moscow, Nauka Publ., 1964. 488 p.
5. Sipaylov V. A. *Teplovyie protsessy pri shlifovanii i upravleniye kachestvom poverhnosti* [Heat processes in grinding and control surface quality]. Moscow, Machine building, Publ., 1978. 167p.
6. Yakimov A. V. Tkachenko V. O. Zimin S. G. *Teploviye protsessy pri obychnom i preryvistom shlifovanii: ucheb. posob* [Heat processes in usual and interruption grinding. Text-book]. Odessa, OGPU, Publ., 1998. 274p.
7. Korchak S. N. *Progressivnaya tekhnologiya i avtomatizatsiya kruglogo shlifovaniya* [Progressive technology and automation grinding]. Moscow, Machine building, Publ., 1968. 108p.
8. Reznikov A. N. *Teplofizika rezaniya* [Heat physics of cutting]. Moscow, Machine building, Publ., 1969. 287 p.

9. Red'ko S. G. *Protsessy teploobrazovaniya pri shlifovanii metallov* [Heat processes in grinding of metals]. Saratov, Izdatel'stvo Saratovskogo universiteta, Publ., 1962. 231 p.
10. Ostrovskiy V. I. *Teoreticheskie osnovy protsessa shlifovaniya* [Basis theory of grinding process]. Leningrad, Izdatel'stvo Leningradskogo universiteta, Publ., 1981. 140 p.
11. Bishutin S. G. *Obespecheniye trebuyemoy sovokupnosti parametrov kachestva poverkhnostnykh sloyov detali pri shlifovanii* [Guarantee demand quality parameters surface layers in grinding]. Moscow, Machine building, Publ., 2004. 144p.
12. Bishutin S. G. Tyul'panov N. V. *Prognozirovaniye teplovydeleniya v kontaktной zone zagotovki i shlifoval'nogo kruga s uchuyotom yego iznashivaniya* [Prognosis heat process in contact zone blank with grinding wheel with calculation it wear]. *Vesnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin Bryansk Technical University]. Publ., 2007. no 2 (14). pp. 4-9.
13. Maslov E. N. *Teoriya shlifovaniya materialov* [Theory grinding materials]. Moscow, Machine building, Publ., 1974. 319 p.
14. Lur'ye G. B. *Shlifovaniye metallov* [Grinding metals]. Moscow, Machine building, Publ., 1969. 172 p.
15. Filimonov L. N. *Vysokoskorostnoye shlifovanie* [High speed grinding]. Leningrad, Machine building, 1979. 246 p.
16. Novikov F. V. *Matematicheskaya model' opredeleniya temperatury shlifovaniya na osnovе uchyoта balansa tepla, ukhodyashchego v obrazuyushchiesya struzhki i obrabatyvayemyyu detal'* [Mathematical model define temperature grinding on the base of balance heat which go into chips and machine part]. *Visnyk Natsional'nogo Tekhnichnogo Universitetu sil's'kogo gospodarstva im. P. Vasylenka* [Bulletin National Technical University Agriculture name by P. Vasilenko]. 2007, Issue 61, pp 22-33.
17. Novikov F. V. Ryabekov L. A. *Teoreticheskiy analiz usloviy povysheniya kachestva obrabotki po temperaturnomu kriteriyu* [Theoretical analysis conditions of raise quality machining by temperature criterion]. *Visnyk Natsional'nogo Tekhnichnogo Universitetu sil's'kogo gospodarstva im. P. Vasylenka* [Bulletin National Technical University Agriculture name by P. Vasilenko]. 2007, Issue 61, pp 164-171.
18. Sizy Y. A., Stalinskiy D. V. *Dinamika i teplofizika shlifovaniya* [Dynamic and heat physics grinding]. Kharkov, GP UKR NTTS Energostal, 2016. 448 p.
19. *Spravochnik tekhnologa-mashinostroityela. V dvuh tomah* [Reference book technologist machine building]. Under edited A. G. Kosilova, R.K.Mescheryakova, eds. T.1. Moscow, Machine building, 1985, 655p.
20. *Spravochnik tekhnologa-mashinostroityela. V dvuh tomah* [Reference book technologist machine building]. Under edited A. G. Kosilova, R.K.Mescheryakova, eds. T.2. Moscow, Machine building, 1985, 491p.

Поступила (received) 26.04.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Сизий Юрій Анатолійович (Сизый Юрий Анатольевич, Sizy Yuri Anatoliyovich) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; професор кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів; тел.. (066) 788-24-41, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3930-3087>, e-mail: sizy.iury@yandex.ua.

Ушаков Олександр Миколайович (Ушаков Александр Николаевич, Ushakov Aleksandr Nikolayevich) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; доцент кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів; тел.: (057) 720-66-25, м. Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7591-3678>; e-mail: parom38@yandex.ru.

Сліпченко Сергій Євгенович (Слипченко Сергей Евгеньевич, Slipchenko Serhii Yevgenovych) – старший викладач Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; тел.: (057)-720-66-25, м. Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0593-3750>, e-mail: serg.slip@gmail.com.