

**Ф.В. Новиков**, докт. техн. наук, ХНЭУ, Харьков;

**О.С. Кленов**, канд. техн. наук, Фирма “ДиМерус Инженеринг”, Харьков

### **ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ КРУГЛОГО НАРУЖНОГО ШЛИФОВАНИЯ ПО КРИТЕРИЯМ ТОЧНОСТИ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ОБРАБОТКИ**

В работе теоретически доказано, что оптимальный автоматизированный цикл круглого наружного шлифования, обеспечивающий наименьшее основное время обработки при заданной точности обработки, определяемой величиной упругого перемещения в технологической системе, осуществляется в один этап, включающий лишь этап выхаживания с созданием в технологической системе начального натяга, равного или кратного величине снимаемого припуска. Для его реализации необходимо применение высокочастотных осциллирующих продольных движений стола станка (или шлифовального круга) и установление максимально возможной скорости вращения детали, исходя из технических характеристик круглошлифовального станка.

**Ключевые слова:** круглое шлифование, обрабатываемая деталь, технологическая система, начальный натяг, упругое перемещение, точность обработки, производительность обработки, снимаемый припуск.

У роботі теоретично доведено, що оптимальний автоматизований цикл круглого зовнішнього шліфування, що забезпечує найменший основний час обробки при заданій точності обробки, обумовлений величиною пружного переміщення в технологічній системі, здійснюється в один етап, який включає лише етап виходжування зі створенням у технологічній системі початкового натягу, рівного або кратного величині припуску, що знімається. Для його реалізації необхідне застосування високочастотних осцилюючих поздовжніх рухів стола верстата (або шліфувального круга) і встановлення максимально можливої швидкості деталі, виходячи з технічних характеристик круглошліфувального верстата.

**Ключові слова:** кругле шліфування, оброблювана деталь, технологічна система, початковий натяг, пружне переміщення, точність обробки, продуктивність обробки, припуск, що знімається.

The paper theoretically define the basic processing cycle time round longitudinal multipass grinding performed in 2 stages (rough grinding and nursing). Installs least most of the time when grinding processing to provide the desired accuracy, determines the magnitude of the elastic displacement occurring in the technological system. On the basis of this solution is theoretically proved that the optimal automated cycle round outer grinding, providing a basic minimum processing time for a given precision processing that determines the magnitude of the elastic displacement in the technological system, is carried out in one step, which includes only the stage of nursing with the establishment of a technological system of initial tightness, equal or multiples shoot allowance. For its implementation requires the use of high-frequency oscillating longitudinal movement of the machine table (or wheel) and the establishment of a poppy-greatest possible speed of rotation of the items based on the technical characteristics of cylindrical grinding machines. Practical recommendations for improving the efficiency of round outer grinding.

**Keywords:** cylindrical grinding, the workpiece, the technological system, the initial tightness, elastic movement, precision machining, processing capacity, removable allowance.

**Введение.** Шлифование является основным методом финишной обработки деталей машин, обеспечивающим высокие показатели точности и качества обрабатываемых поверхностей. Благодаря образованию тончайших срезов абразивными зёрнами резко снижается силовая напряженность процесса шлифования, что приводит к уменьшению упругих перемещений, возникающих в технологической системе, и соответственно погрешностей обработки. В особой мере это относится к операциям круглого наружного шлифования, основанных на реализации автоматизированных циклов шлифования. Однако такой режим обработки, как правило, снижает производительность, что неэффективно. Поэтому актуальной задачей является поиск оптимальных условий шлифования, обеспечивающих одновременное повышение точности и производительности обработки. Это требует решения оптимизационных задач в технологии машиностроения.

**Анализ последних достижений и литературы.** Традиционно цикл круглого наружного шлифования выполняется в несколько этапов, включая черновое (чистовое) шлифование и выхаживание [1]. Это позволяет уменьшить и даже исключить отрицательное влияние упругих перемещений, возникающих в технологической системе, на точность обработки. С целью исключения переходного процесса в начале обработки и повышения производительности рекомендуется создание начального натяга в технологической системе. В этом случае этап чернового шлифования протекает в установившемся во времени процессе обработки, что позволяет автоматизировать цикл круглого наружного шлифования [1]. Однако, в работах [2, 3] теоретически показано, что данный автоматизированный цикл шлифования не является оптимальным с точки зрения обеспечения максимально возможной производительности обработки с учетом ограничения по точности обработки, определяемой упругими перемещениями в технологической системе. Это требует уточнения известных решений. Поэтому важно установить наименьшее основное время обработки при шлифовании, обеспечивающее заданную точность обработки, определяемую величиной упругого перемещения, возникающего в технологической системе.

**Цель работы, постановка проблемы.** Целью работы является повышение эффективности круглого наружного шлифования на основе оптимизации параметров шлифования по критериям точности и производительности обработки. Задача состоит в теоретическом обосновании оптимального автоматизированного цикла круглого наружного шлифования.

**Материалы исследований.** Для упрощения расчетов рассмотрим цикл круглого наружного многопроходного шлифования, выполняемый в два этапа (черновое шлифование и выхаживание), и аналитически определим основное время обработки  $\tau$  на этих двух этапах. Затем, принимая в качестве

ограничения заданную точность обработки, определяемую величиной упругого перемещения  $y_0$  на этапе выхаживания, установим наименьшее основное время обработки цикла круглого наружного шлифования, рассматривая его в качестве критерия оптимизации.

На этапе чернового шлифования величина упругого перемещения  $y_1$ , возникающего в технологической системе, определяется зависимостью [4]:

$$y_1 = \frac{P_y}{c} = \frac{P_z}{c \cdot K_{ш}} = \frac{\sigma \cdot S_{мгн}}{c \cdot K_{ш}} = \frac{\sigma}{c \cdot K_{ш}} \cdot \frac{Q}{V_{кр}}, \quad (1)$$

где  $P_z$ ,  $P_y$  – тангенциальная и радиальная составляющие силы резания, Н;  $K_{ш} = P_z / P_y$ ;  $\sigma$  – условное напряжения резания, Н/м<sup>2</sup>;  $S_{мгн} = Q / V_{кр}$  – суммарная мгновенная площадь поперечного сечения среза всеми одновременно работающими зёрнами круга, м<sup>2</sup>;  $Q$  – производительность обработки, м<sup>3</sup>/с;  $V_{кр}$  – скорость круга, м/с.

Для исключения переходного процесса на этапе чернового шлифования и повышения производительности обработки необходимо в технологической системе создать начальный натяг, равный величине  $y_1$ .

Производительность обработки может быть представлена в виде

$$Q = \frac{g}{\tau_1}, \quad (2)$$

где  $g$  – объем металла, снимаемого с обрабатываемой детали, м<sup>3</sup>;  $\tau_1$  – основное время обработки на этапе чернового шлифования, с.

Тогда с учетом зависимостей (1) и (2) получено

$$\tau_1 = \frac{\sigma}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \cdot \frac{g}{y_1}. \quad (3)$$

В полученной зависимости величина  $y_1$  неизвестна, ее будем рассматривать в качестве основного параметра оптимизации.

Величина упругого перемещения  $y_0$ , возникающего в технологической системе на этапе выхаживания при круглом продольном многопроходном шлифовании, может быть определена на основе известной зависимости [5]:

$$y_0 = \frac{y_1}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}{\sigma \cdot S \cdot V_{дет}}\right)^{n_2}}, \quad (4)$$

где  $S$  – продольная подача, м/об;  $V_{дет}$  – скорость вращения детали, м/с;  $n_2$  – количество продольных ходов круга на этапе выхаживания.

Продольная подача  $S$  выражается:

$$S = \frac{S_m}{V_{\text{дем}}} \cdot \pi \cdot D_{\text{дем}}, \quad (5)$$

где  $S_m$  – скорость продольной подачи, м/с;  $D_{\text{дем}}$  – диаметр детали, м.

При круглом продольном многопроходном шлифовании детали длины  $l$  основное время обработки на этапе выхаживания определяется:

$$\tau_2 = \frac{l}{S_m} \cdot n_2. \quad (6)$$

Откуда

$$S_m = \frac{l}{\tau_2} \cdot n_2. \quad (7)$$

Тогда зависимость (4) с учетом зависимостей (5), (6) и (7), выразится:

$$y_0 = \frac{y_1}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{\text{ш}} \cdot V_{\text{кр}}}{\sigma} \cdot \frac{\tau_2}{\pi \cdot D_{\text{дем}} \cdot l \cdot n_2}\right)^{n_2}}. \quad (8)$$

Разрешая зависимость (8) относительно  $\tau_2$  имеем

$$\tau_2 = \frac{\pi \cdot D_{\text{дем}} \cdot \sigma \cdot l \cdot n_2}{c \cdot K_{\text{ш}} \cdot V_{\text{кр}}} \cdot \left[ \left( \frac{y_1}{y_0} \right)^{\frac{1}{n_2}} - 1 \right]. \quad (9)$$

Основное время обработки цикла круглого продольного многопроходного шлифования, выполняемого в 2 этапа (черновое шлифование и выхаживание), определяется:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 = \frac{\sigma}{c \cdot K_{\text{ш}} \cdot V_{\text{кр}}} \cdot \left\{ \frac{g}{y_1} + \pi \cdot D_{\text{дем}} \cdot l \cdot n_2 \cdot \left[ \left( \frac{y_1}{y_0} \right)^{\frac{1}{n_2}} - 1 \right] \right\}. \quad (10)$$

Используя зависимость (10), проведем оптимизацию данного цикла шлифования по критерию наименьшего основного времени обработки  $\tau$  с учетом ограничения по точности обработки, определяемой величиной упругого перемещения  $y_0$  на этапе выхаживания (принимая ее заданной).

Из зависимости (10) следует, что основное время обработки  $\tau$  неоднозначно зависит от двух переменных величин  $y_1$  и  $n_2$ . Причем, величина  $y_1$  входит в два слагаемых зависимости (10), а величина  $n_2$  – лишь во второе слагаемое, определяющее основное время обработки на этапе

выхаживания. Следовательно, эти две величины –  $y_1$  и  $n_2$  необходимо рассматривать в качестве параметров оптимизации (переменных величин). Для определения экстремального значения  $\tau$  подчиним (10) необходимому условию экстремума  $\tau'_{y_1} = 0$ ;  $\tau'_{n_2} = 0$ :

$$\tau'_{y_1} = \frac{\sigma}{c \cdot K_{\text{ш}} \cdot V_{\text{кр}}} \cdot \left( -\frac{\mathcal{G}}{y_1^2} + \pi \cdot D_{\text{дем}} \cdot l \cdot \frac{y_1^{\frac{1}{n_2}-1}}{y_0^{\frac{1}{n_2}}} \right) = 0; \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \tau'_{n_2} &= \frac{\sigma}{c \cdot K_{\text{ш}} \cdot V_{\text{кр}}} \cdot \left\{ \pi \cdot D_{\text{дем}} \cdot l \cdot \left[ \left( \frac{y_1}{y_0} \right)^{\frac{1}{n_2}} - 1 \right] - \pi \cdot D_{\text{дем}} \cdot l \cdot \frac{\ln y_1}{n_2} \cdot \left( \frac{y_1}{y_0} \right)^{\frac{1}{n_2}} \right\} = \\ &= \frac{\pi \cdot D_{\text{дем}} \cdot l \cdot \sigma}{c \cdot K_{\text{ш}} \cdot V_{\text{кр}}} \cdot \left[ \left( \frac{y_1}{y_0} \right)^{\frac{1}{n_2}} - 1 - \left( \frac{y_1}{y_0} \right)^{\frac{1}{n_2}} \cdot \frac{\ln y_1}{n_2} \right] = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

Как показали расчеты, вторые производные  $\tau''_{y_1}$  и  $\tau''_{n_2}$  в точках экстремумов положительны. Следовательно, имеют место минимумы основного времени обработки  $\tau$  (рис. 1). Решая уравнения (11) и (12) с учетом  $\mathcal{G} = \pi \cdot D_{\text{дем}} \cdot l \cdot \Pi$  получено:

$$y_{1\text{эксп}} = \Pi^{\frac{n_2}{1+n_2}} \cdot y_0^{\frac{1}{1+n_2}}; \quad (13)$$

$$\left( \frac{y_1}{y_0} \right)^{\frac{1}{n_2}} \cdot \left( 1 - \frac{\ln y_1}{n_2} \right) = 1, \quad (14)$$

где  $\Pi$  – величина снимаемого припуска, м.

Очевидно, уравнение (14) выполняется при условии  $n_2 \rightarrow \infty$ . Тогда, исходя из зависимости (13), имеем

$$y_{1\text{эксп}} = \Pi. \quad (15)$$

Таким образом показано, что на этапе черного шлифования съём обрабатываемого материала отсутствует, т.к. величина упругого перемещения, возникающего в технологической системе, равна величине снимаемого припуска  $\Pi$ . Съём металла и формирование заданной точности обработки происходит на этапе выхаживания. Следовательно, для того чтобы существенно уменьшить основное время обработки на этапе черного шлифования, необходимо его выполнять с ускоренной радиальной подачей, создавая в технологической системе начальный натяг, равный величине

снимаемого припуска  $\Pi$ . В этом случае  $\tau_1 \approx 0$ , тогда минимальное основное время обработки рассматриваемого цикла шлифования определится:

$$\tau_{min} \approx \tau_2 = \frac{\pi \cdot D_{dem} \cdot l \cdot \sigma \cdot n_2}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \cdot \left[ \left( \frac{\Pi}{y_0} \right)^{\frac{1}{n_2}} - 1 \right]. \quad (16)$$

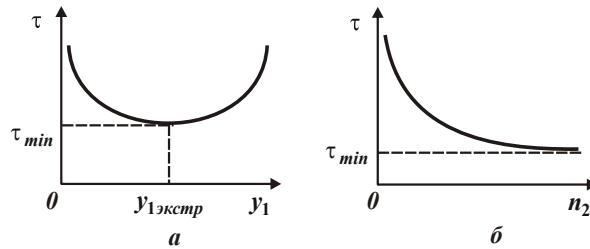


Рисунок 1 – Зависимость  $\tau$  от  $y_1$  (а) и  $n_2$  (б)

Подставляя в зависимость (16) условие  $n_2 \rightarrow \infty$ , приходим к неопределенности  $(0 \cdot \infty)$ . Для ее раскрытия воспользуемся правилом Лопиталя. В итоге получено:

$$\tau_{min} = \frac{\pi \cdot D_{dem} \cdot l \cdot \sigma}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \cdot \lim_{n_2 \rightarrow \infty} \frac{\left[ \left( \frac{\Pi}{y_0} \right)^{\frac{1}{n_2}} - 1 \right]'}{\left( \frac{1}{n_2} \right)'_{n_2}} = \frac{\pi \cdot D_{dem} \cdot l \cdot \sigma}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \cdot \ln \left( \frac{\Pi}{y_0} \right). \quad (17)$$

Как видно, в зависимости (16) преобладает множитель, заключенный в квадратные скобки, который с увеличением  $n_2$  приводит к уменьшению основного времени обработки  $\tau_{min}$ . Поскольку  $\tau_{min} \approx \tau_2$ , то согласно зависимости (б), уменьшить  $\tau_2$  с увеличением  $n_2 \rightarrow \infty$  можно увеличением  $S_M \rightarrow \infty$ , а соответственно и увеличением  $V_{dem} \rightarrow \infty$ . Очевидно, в реальных условиях шлифования увеличение параметров режима резания  $S_M \rightarrow \infty$  и  $V_{dem} \rightarrow \infty$  ограничено техническими возможностями круглошлифовального станка. Поэтому параметр  $n_2$  будет принимать не бесконечные, а конечные значения. Это указывает на недоиспользование технологических возможностей процесса круглого наружного шлифования, т.к. основное

время обработки  $\tau_{min}$  будет принимать значения, соответственно превышающие значения, рассчитанные по зависимости (17). В этом случае величина  $\tau_{min}$  может быть рассчитана по зависимости (16) для вполне конкретного значения  $n_2$ . Причем, значения  $\tau_{min}$  и  $\tau_2$ , рассчитанные по зависимостям (6) и (16), должны совпадать. Это будет свидетельствовать о правильности выполненных расчетов.

Согласно зависимости (5), скорость продольной подачи на этапе выхаживания определяется:

$$S_m = V_{dem} \cdot \frac{S}{\pi \cdot D_{dem}}. \quad (18)$$

Следовательно, увеличить  $S_m$  можно установлением максимально возможных значений скорости вращения детали  $V_{dem}$  и подачи  $S$ .

Фактическая глубина шлифования в начальный момент обработки на этапе выхаживания равна величине припуска  $\Pi$ . С течением времени обработки она уменьшается, что способствует снижению тепловой напряженности процесса и обеспечению высококачественной обработки. Очевидно, чем меньше величина  $\Pi$ , тем ниже тепловая напряженность процесса. Поэтому  $\Pi$  необходимо уменьшать или периодически создавать в технологической системе натяги, кратные величине припуска. Этим можно регулировать тепловую напряженность процесса.

Из зависимости (17) следует, что уменьшить основное время обработки  $\tau_{min}$  можно уменьшением  $D_{dem}$ ,  $l$ ,  $\Pi$ ,  $\sigma$  и увеличением  $c$ ,  $K_{ш}$ ,  $V_{кр}$ ,  $y_0$ . Учитывая то, что переменными параметрами являются  $\sigma$  и  $K_{ш}$ , уменьшить основное время обработки  $\tau_{min}$  можно главным образом за счет повышения режущей способности шлифовального круга.

Таким образом, теоретически обоснована эффективность осуществления автоматизированного цикла круглого наружного шлифования в один этап, включающий лишь этап выхаживания с созданием в технологической системе начального натяга, равного или кратного величине снимаемого припуска, и применением высокочастотных осциллирующих продольных движений стола станка (или шлифовального круга). При этом скорость вращения детали должна быть установлена максимально возможной, исходя из технических характеристик круглошлифовального станка. Данный режим обработки обеспечит получение требуемых показателей точности и качества поверхности при наименьшем основном времени обработки цикла круглого наружного продольного шлифования.

**Выводы.** Получено новое теоретическое решение об определении наименьшего основного времени обработки при шлифовании, которое

обеспечивает заданную точность обработки, определяемую величиной упругого перемещения, возникающего в технологической системе. Установлено, что оптимальный (с точки зрения наименьшего основного времени обработки) автоматизированный цикл круглого наружного шлифования осуществляется в один этап, включающий лишь этап выхаживания с созданием в технологической системе начального натяга, равного или кратного величине снимаемого припуска. При этом необходимо применение высокочастотных осциллирующих продольных движений стола станка (или шлифовального круга) и установление максимально возможной скорости вращения детали, исходя из технических характеристик круглошлифовального станка. Полученное теоретическое решение позволило уточнить известное решение, согласно которому применяемый на практике автоматизированный цикл круглого наружного шлифования выполняется в несколько этапов, включая черновое (чистовое) шлифование и выхаживание. Как установлено теоретически, этот цикл менее производительный по сравнению с рекомендуемым в работе циклом.

**Список использованных источников:** 1. Лурье Г.Б. Шлифование металлов / Г.Б. Лурье. – М.: Машиностроение, 1969. – 197 с. 2. Ковальчук А.Н. Оптимизация структуры и параметров операций шлифования ответственных валов приводов шахтных конвейеров: автореф. дис. на соискание научн. степени канд. техн. наук: спец. 05.02.08 “Технология машиностроения” / А.Н. Ковальчук. – Одесса, 2008. – 21 с. 3. Рябенков І.О. Підвищення ефективності фінішної обробки деталей гідроапаратури на основі вибору раціональної структури і параметрів операцій: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.02.08 “Технологія машинобудування” / І.О. Рябенков. – Одеса, 2009. – 21 с. 4. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 10. “Концепции развития технологии машиностроения” – Одесса: ОНПУ, 2005. – 565 с. 5. Новіков Ф.В. Теоретичні основи механічної обробки високоточних деталей : монографія / Ф.В. Новіков, І.О. Рябенков. – Х. : Вид. ХНЕУ, 2013. – 352 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Lure G.B. Shlifovanie metallov / G.B. Lure. – M.: Mashinostroenie, 1969. – 197 s. 2. Kovalchuk A.N. Optimizatsiya struktury i parametrov operatsiy shlifovaniya otvetstvennykh valov privodov shakhtnykh konveyerov: avtoref. dis. na soiskanie nauchn. stepeni kand. tekhn. nauk: spets. 05.02.08 “Tekhnologiya mashinostroeniya” / A.N. Kovalchuk. – Odessa, 2008. – 21 s. 3. Ryabenkov I.O. Pidvyshennia efektyvnosti finishnoi obrobky detalei gidroaparatury na osnovi vyboru ratsionalnoi struktury i parametrov operatsiy: avtoref. dis. na zdobuttia nauk. stupenia kand. tekhn. nauk: spets. 05.02.08 “Tekhnologiiia mashynobuduvannia” / I.O. Ryabenkov. – Odesa, 2009. – 21 s. 4. Fiziko-matematicheskaya teoriya protsessov obrabotki materialov i tekhnologii mashinostroeniya / Pod obsh. red. F.V. Novikova i A.V. Yakimova. V 10 tomakh. – T. 10. “Kontseptsii razvitiya tekhnologii mashinostroeniya” – Odessa: ONPU, 2005. – 565 s. 5. Novikov F.V. Teoretychni osnovy mekhanichnoi obrobky vysokotochnykh detaley: monografiya / F.V. Novikov, I.O. Ryabenkov. – Kh. : Vyd. KhNEU, 2013. – 352 s.