

УДК 621.923

ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ И ПАРАМЕТРОВ ОПЕРАЦИИ ШЛИФОВАНИЯ ВНУТРЕННИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПО КРИТЕРИЮ НАИМЕНЬШЕГО ОСНОВНОГО ВРЕМЕНИ ОБРАБОТКИ

Новиков Ф.В., докт. техн. наук, **Ковальчук А.Н.**, канд. техн. наук,
Бережной Р.А.

*(Харьковский национальный экономический университет,
ОАО Харьковский машиностроительный завод "Свет шахтера")*

Введение и постановка задачи. Обеспечение высоких показателей точности обработки деталей машин является важнейшим условием повышения их эксплуатационных свойств и надежности работы машины в целом. Поэтому вопросам точности обработки деталей в технологии машиностроения постоянно уделяется большое внимание [1,2,3]. В значительной степени это относится к финишной обработке внутренних цилиндрических поверхностей деталей редукторов, к которым предъявляются высокие требования по точности обработки. Однако их выполнение характеризуется высокой трудоемкостью финишных операций, в частности, операций внутреннего шлифования. Как показывает практика, основной причиной низкой эффективности обработки является возникновение значительных упругих перемещений в технологической системе в связи с относительно низкой жесткостью ее элементов при внутреннем шлифовании. Применение абразивных кругов с повышенной режущей способностью в полном объеме данную задачу не решает. Перспективным направлением ее решения является оптимальное управление упругими перемещениями в процессе внутреннего шлифования, для чего необходимо математически описать закономерности их изменения во времени и на этой основе провести оптимизацию структуры и параметров внутреннего шлифования по критерию наименьшего основного времени обработки с учетом ограничения по точности размера обрабатываемой поверхности. В связи с этим решение задачи повышения эффективности финишной обработки внутренних цилиндрических поверхностей деталей редукторов приводов шахтных конвейеров имеет большое научное и практическое значение, т.к. позволяет повысить качество и долговечность изготавливаемых машин. Цель работы – повышение точности и производительности обработки внутренних цилиндрических поверхностей деталей редукторов на финишных операциях путем оптимизации их структуры и параметров.

Материалы и результаты исследований. Предположим, что в системе создан начальный натяг величиной y_0 и шлифование производится с отключенной радиальной подачей станка, т.е. съем материала происходит за счет возникающих в технологической системе упругих перемещений. Тогда на 1-ом проходе круга (в

продольном направлении) будет выполняться условие: $y_0 = t_1 + y$, где t_1 – глубина шлифования на 1-ом проходе круга, м; $y = \frac{\sigma \cdot Q_\phi}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} = \frac{\sigma \cdot H \cdot V_{дет} \cdot t_1}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} = B_1 \cdot t_1$ – величина упругого перемещения в технологической системе [4], м; σ – условное напряжение резания, Н/м²; $K_{ш} = P_z / P_y$ – коэффициент шлифования; P_z, P_y – тангенциальная и радиальная составляющие силы резания, Н; c – жесткость технологической системы, Н/м; $Q_\phi = H \cdot V_{дет} \cdot t_1$ – фактическая производительность обработки, м³/с; H – ширина шлифования (высота круга), м; $V_{кр}, V_{дет}$ – скорости круга и детали, м/с; t_ϕ – фактическая глубина шлифования, м; $B_1 = \frac{\sigma \cdot H \cdot V_{дет}}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}$ – безразмерный параметр.

Из условия $y_0 = t_1 + y$ имеем $t_1 = \frac{y_0}{(1 + B_1)} = y_0 \cdot m_1$, где $m_1 = \frac{1}{(1 + B_1)}$. На 2-ом проходе круга условие $y_0 = t_1 + y$ видоизменится: $y_0 - t_1 = t_2 + y$ или $y_0 - t_1 = t_2 + m_1 \cdot t_2$, где t_2 – глубина шлифования на 2-ом проходе круга, м. Откуда $t_2 = y_0 \cdot m_1 \cdot (1 - m_1)$.

На 3-ем проходе круга условие $y_0 = t_1 + y$ опишется: $y_0 - t_1 - t_2 = t_3 + y$ или $y_0 - t_1 - t_2 = t_3 + m_1 \cdot t_3$, где t_3 – глубина шлифования на 3-ем проходе круга, м. Откуда $t_3 = y_0 \cdot m_1 \cdot [1 - m_1 - m_1 \cdot (1 - m_1)] = y_0 \cdot m_1 \cdot (1 - m_1)^2$.

На 4-ом проходе условие $y_0 = t_1 + y$ опишется: $y_0 - t_1 - t_2 - t_3 = t_4 + y$ или $y_0 - t_1 - t_2 - t_3 = t_4 + m_1 \cdot t_4$, где t_4 – глубина шлифования на 4-ом проходе круга, м. Откуда $t_4 = y_0 \cdot m_1 \cdot [1 - m_1 - m_1 \cdot (1 - m_1) - m_1 \cdot (1 - m_1)^2] = y_0 \cdot m_1 \cdot (1 - m_1)^3$.

Данное решение можно распространить для определения глубины шлифования t_n на n -ном проходе круга: $t_n = y_0 \cdot m_1 \cdot (1 - m_1)^{n-1}$. Как следует из рис. 1, с увеличением количества проходов круга n глубина шлифования t_n уменьшается. Причем, характер изменения t_n с увеличением n подчиняется закону бесконечно убывающей геометрической прогрессии со знаменателем $(1 - m_1)$.

Представим $t_n = y_0 \cdot \frac{m_1}{(1 - m_1)} \cdot (1 - m_1)^n$. С учетом $m_1 = \frac{1}{(1 + B_1)}$ соотношение $\frac{m_1}{(1 - m_1)} = B_1$, тогда $t_n = \frac{y_0}{B_1} \cdot (1 - m_1)^n = \frac{y_0}{B_1} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{B_1}\right)^n}$.

Параметр t_n представляет собой фактическую глубину шлифования на n -ном проходе круга. Как видно, с увеличением n фактическая глубина шлифования t_n непрерывно уменьшается, подчиняясь закону убывающей геометрической прогрессии со знаменателем $q = (1 - m_1)$. Сумма значений фактической

глубины шлифования t_1, \dots, t_n равна $S_n = \frac{y_0}{B_1} \cdot \left[(1 - m_1) + (1 - m_1)^2 + \dots + (1 - m_1)^n \right]$.

С учетом известной зависимости для определения суммы первых n членов убывающей геометрической прогрессии $S_n = \frac{(a_1 - a_n \cdot q)}{(1 - q)}$, получено

$S_n = y_0 \cdot \left[1 - (1 - m_1)^n \right]$, где $a_1 = \frac{y_0}{B_1} \cdot (1 - m_1)$; $a_n = \frac{y_0}{B_1} \cdot (1 - m_1)^n$ – соответственно первый и n -ный члены убывающей геометрической прогрессии.

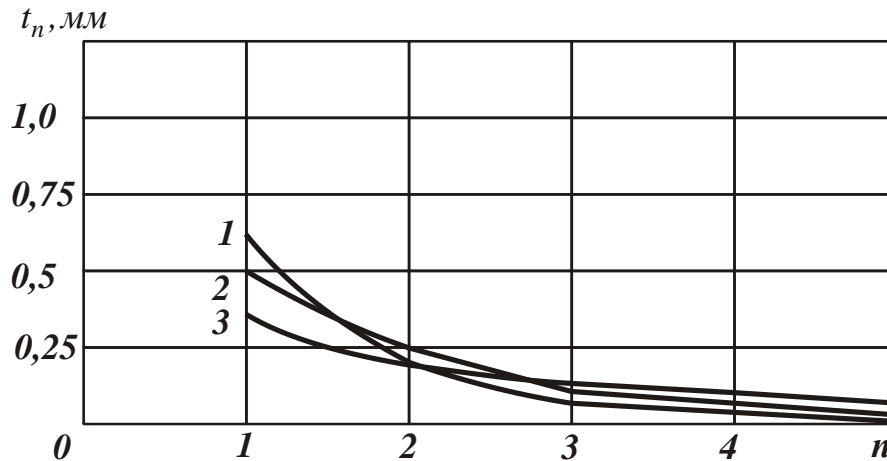


Рис. 1. Зависимость параметра t_n от количества проходов круга n при выхаживании: 1 – $B_1=0,5$; 2 – $B_1=1$; 3 – $B_1=2$.

С учетом $m_1 = \frac{1}{(1 + B_1)}$, имеем

$$S_n = y_0 \cdot \left[1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{B_1} \right)^n} \right]. \quad (1)$$

Используя полученную зависимость (1), определим величину упругого перемещения $y = y_0 - S_n$:

$$y = \frac{y_0}{\left(1 + \frac{1}{B_1} \right)^n}. \quad (2)$$

Как видно, с увеличением n величина y непрерывно уменьшается. Однако, интенсивность ее уменьшения зависит от безразмерного параметра $B_1 = \frac{\sigma \cdot H \cdot V_{dem}}{c \cdot K_{ui} \cdot V_{кр}}$. При условиях $B_1 \ll 1$ и $B_1 \gg 1$ зависимость (2) упрощается:

$$y \approx y_0 \cdot B_1^n = y_0 \cdot \left(\frac{\sigma \cdot H \cdot V_{дет}}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \right)^n, \quad (3)$$

$$y \approx y_0. \quad (4)$$

Как видно, в первом случае, согласно зависимости (3), чем меньше безразмерный параметр $B_1 \ll 1$, тем меньше величина упругого перемещения y . В этом случае с увеличением n величина y будет непрерывно уменьшаться.

Во втором случае, исходя из зависимости (4), величина упругого перемещения y фактически будет оставаться постоянной или несущественно уменьшаться с увеличением n . На первый взгляд может показаться, что добиться исправления погрешностей обработки в данном случае сложно, т.к. шлифовальный круг, по сути, будет копировать форму обрабатываемой поверхности фактически без съема материала. Однако, проведенный анализ основного времени обработки τ показал, что наименьшее основное время обработки (при обеспечении заданного значения y) достигается именно во втором случае. Данный вывод вытекает из следующих расчетов.

Основное время обработки τ при плоском шлифовании определяется зависимостью $\tau = \tau_0 \cdot n$, где $\tau_0 = L/V_{дет}$ – время одного продольного хода круга, с; L – длина хода круга, м.

Разрешим зависимость (2) относительно параметра $B_1 = \frac{1}{\left(\sqrt[n]{\frac{y_0}{y}} - 1 \right)}$. Вы-

ражая скорость детали $V_{дет}$ через основное время обработки τ , получим

$$\tau = \frac{\sigma \cdot H \cdot L \cdot n}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \cdot \left(\sqrt[n]{\frac{y_0}{y}} - 1 \right). \quad (5)$$

В итоге пришли к зависимости, которая была получена в работе [5]. Как видно, количество проходов круга n неоднозначно влияет на основное время обработки τ . При $n \rightarrow \infty$ функция τ имеет неопределенность вида $(\infty \cdot 0)$.

Осуществляя переход к неопределенности вида $\left(\frac{0}{0} \right)$ и подчиняя полученную зависимость правилу Лопиталья, имеем

$$\tau = \frac{\sigma \cdot H \cdot L}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \cdot \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\left(\sqrt[n]{\frac{y_0}{y}} - 1 \right)'}{\left(\frac{1}{n} \right)'} = \frac{\sigma \cdot H \cdot L}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \cdot \ln \frac{y_0}{y}. \quad (6)$$

Таким образом, теоретически доказано, что с увеличением $n \rightarrow \infty$ и $V_{дет} \rightarrow \infty$ в соответствии с зависимостью $\tau = \tau_0 \cdot n$, основное время обработки τ уменьшается, асимптотически приближаясь к минимальному значению (рис. 2). Следовательно, более эффективным с точки зрения уменьшения τ (при

обеспечении заданного значения y), является второй случай, когда $B_1 \gg 1$, т.е. случай многопроходного шлифования. Несмотря на то, что второе слагаемое в знаменателе зависимости (2) стремится к нулю, за счет бесконечного увеличения n происходит уменьшение величины y и таким образом достигается эффект шлифования по критерию наименьшего основного времени обработки τ .

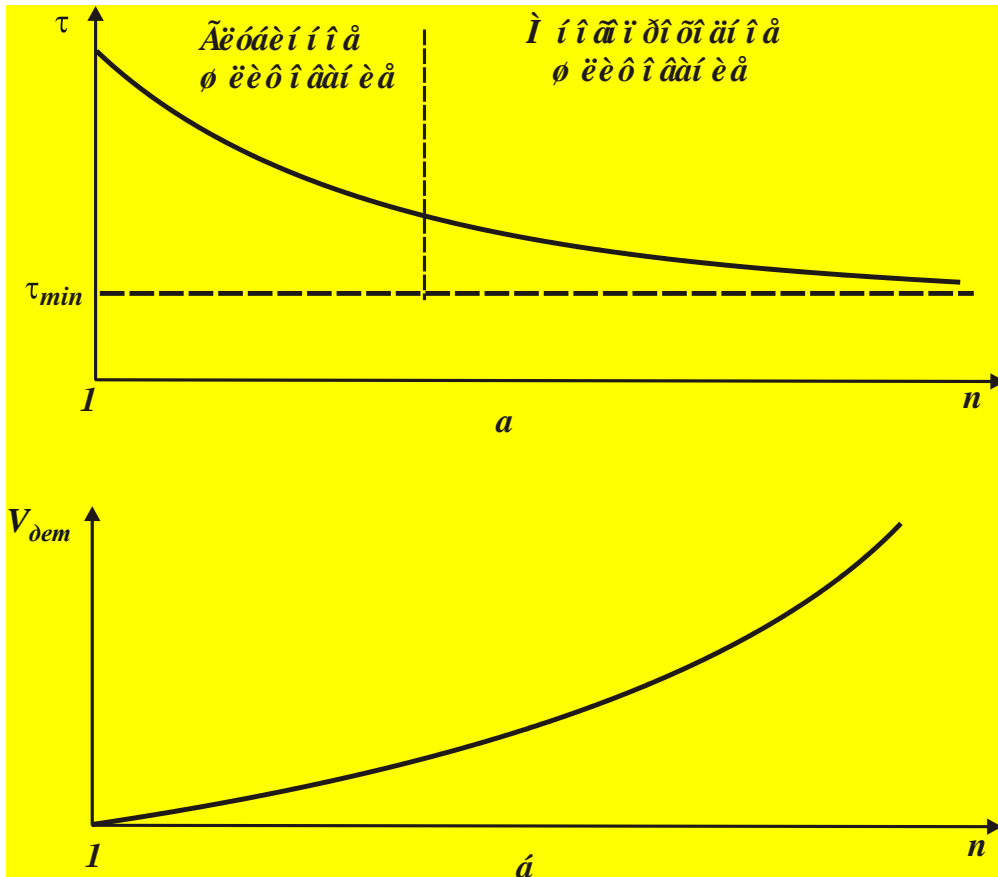


Рис. 2. Зависимости основного времени обработки τ (а) и скорости детали V_{dem} (б) от количества проходов круга n .

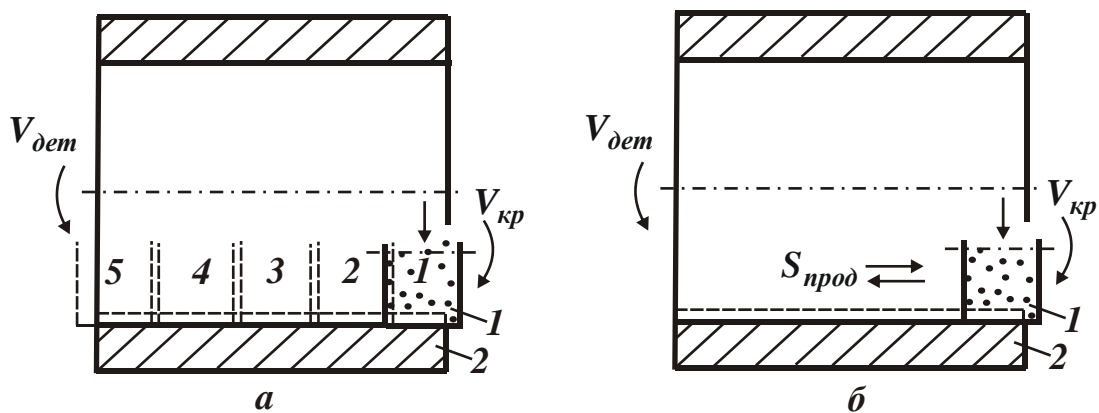


Рис. 3. Схемы круглого внутреннего шлифования: а – без продольной подачи (схема шлифования последовательными врезаниями – с радиальной подачей уступами); б – с продольной подачей.

Используя полученную зависимость (6), оценим возможности уменьшения основного времени обработки τ при круглом внутреннем шлифовании, реализуя упругую схему шлифования с начальным натягом в технологической системе, равным или кратным величине снимаемого припуска (т.е., по сути, рассмотренную выше схему выхаживания). Для этого проанализируем две схемы шлифования: с отключенной и включенной продольной подачей, рис. 3. В первом случае величина L примет вид $L = \pi \cdot D_{dem}$ и соответственно зависимость (6), описывающая минимальное значение основного времени обработки, выразится

$$\tau_{min} = \frac{\pi \cdot D_{dem} \cdot H \cdot \sigma}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \cdot \ln \frac{y_0}{y}. \quad (7)$$

Как известно, основной причиной низкой эффективности круглого внутреннего шлифования (по критериям точности и производительности обработки) является низкая жесткость технологической системы c . Это подтверждается зависимостью (7), согласно которой с уменьшением жесткости c основное время обработки τ увеличивается. Добиться уменьшения τ в этих условиях (при заданном значении y) можно лишь уменьшением отношения $\sigma / K_{рез}$ и увеличением скорости круга $V_{кр}$. Следовательно, возможность уменьшения τ при круглом внутреннем шлифовании весьма ограничена.

Необходимо отметить, что зависимость (7) получена при условиях: $n \rightarrow \infty$ и $V_{dem} \rightarrow \infty$. Естественно, в реальных условиях шлифования скорость детали V_{dem} не беспредельна. Поэтому ее следует устанавливать максимально возможной для каждого конкретного шлифовального станка.

Учитывая то, что возможности увеличения скорости круга $V_{кр}$ ограничены, основным путем уменьшения τ является уменьшение энергоемкости обработки σ за счет повышения режущей способности круга, а также снижения интенсивности трения в зоне резания на основе применения эффективных технологических сред, импрегнации (термообработки) абразивного круга и т.д.

Эффективным решением в данном направлении является обеспечение режима самозатачивания круга, который благодаря интенсивному износу позволяет своевременно удалять с рабочей поверхности круга затупившиеся абразивные зерна, не допуская образования на них значительных площадок износа, а также не допуская засаливания рабочей поверхности круга продуктами обработки. Для практической реализации данного условия целесообразно использовать мягкие и среднемягкие абразивные круги или алмазные круги на относительно мягких связках (органической и керамической).

При использовании алмазных кругов на прочных металлических связках необходимо применять эффективные методы электроэрозионной или электрохимической правки круга с целью постоянного поддержания в процессе шлифования его высокой режущей способности.

Рассмотрим теперь вторую схему круглого внутреннего шлифования – с продольной подачей, т.е. схему круглого внутреннего продольного шлифования. В этом случае зависимость $\tau = \tau_0 \cdot n$ примет вид $\tau = n \cdot l / S_{прод}$, где l –

длина обрабатываемой детали (длина обрабатываемого отверстия), м; $S_{прод}$ – скорость продольной подачи, м/с.

Выразим безразмерный параметр $B_1 = \frac{\sigma \cdot H \cdot V_{дет}}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}$ применительно к условиям круглого внутреннего шлифования. Для этого воспользуемся кинематическим соотношением $\frac{\pi \cdot D_{дет}}{V_{дет}} = \frac{H}{S_{прод}}$, выражающим время одного вращения обрабатываемой детали. Разрешая его, получим $V_{дет} \cdot H = \pi \cdot D_{дет} \cdot S_{прод}$. Тогда $B_1 = \frac{\pi \cdot D_{дет} \cdot S_{прод} \cdot \sigma}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}$ и $\frac{\pi \cdot D_{дет} \cdot S_{прод} \cdot \sigma}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} = \frac{1}{\left(\sqrt[n]{\frac{y_0}{y}} - 1\right)}$.

Выражая в зависимости скорость продольной подачи $S_{прод}$ через τ , имеем

$$\tau = \frac{\sigma \cdot F \cdot n}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \cdot \left(\sqrt[n]{\frac{y_0}{y}} - 1\right), \quad (8)$$

где $F = \pi \cdot D_{дет} \cdot l$ – площадь обрабатываемой поверхности, м².

В результате получили зависимость, аналогичную (5), в которой функцию скорости детали $V_{дет}$ выполняет скорость продольной подачи $S_{прод}$. Также как и в зависимости (5), основное время обработки τ неоднозначно зависит от количества проходов круга n . Поэтому, подчиняя зависимость (8) правилу Лопиталя (для раскрытия неопределенности вида $\left(\frac{0}{0}\right)$), приходим к зависимости

$$\tau_{min} = \frac{\sigma \cdot F}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \cdot \ln \frac{y_0}{y}. \quad (9)$$

Данная зависимость справедлива для условий обработки $n \rightarrow \infty$ и $S_{прод} \rightarrow \infty$, т.е. эффективно обработку выполнять по схеме многопроходного шлифования (рис. 4).

Как известно, на практике реализуется условие $S_{прод} \ll V_{дет}$. Поэтому бесконечно увеличивать скорость продольной подачи $S_{прод}$ нельзя, она может изменяться в небольших пределах. Следовательно, реализовать на практике при круглом внутреннем шлифовании минимально возможное значение τ_{min} не представляется возможным. В то же время получило применение круглое наружное и внутреннее шлифование с продольной осцилляцией круга, позволяющее существенно увеличить скорость подачи $S_{прод}$ по сравнению с традиционно применяемыми схемами внутреннего продольного многопроходного шлифования. Этим, отчасти, подтверждается достоверность приведенного выше теоретического решения, согласно которому эффект обработки достигается за счет увеличения $S_{прод} \rightarrow \infty$.

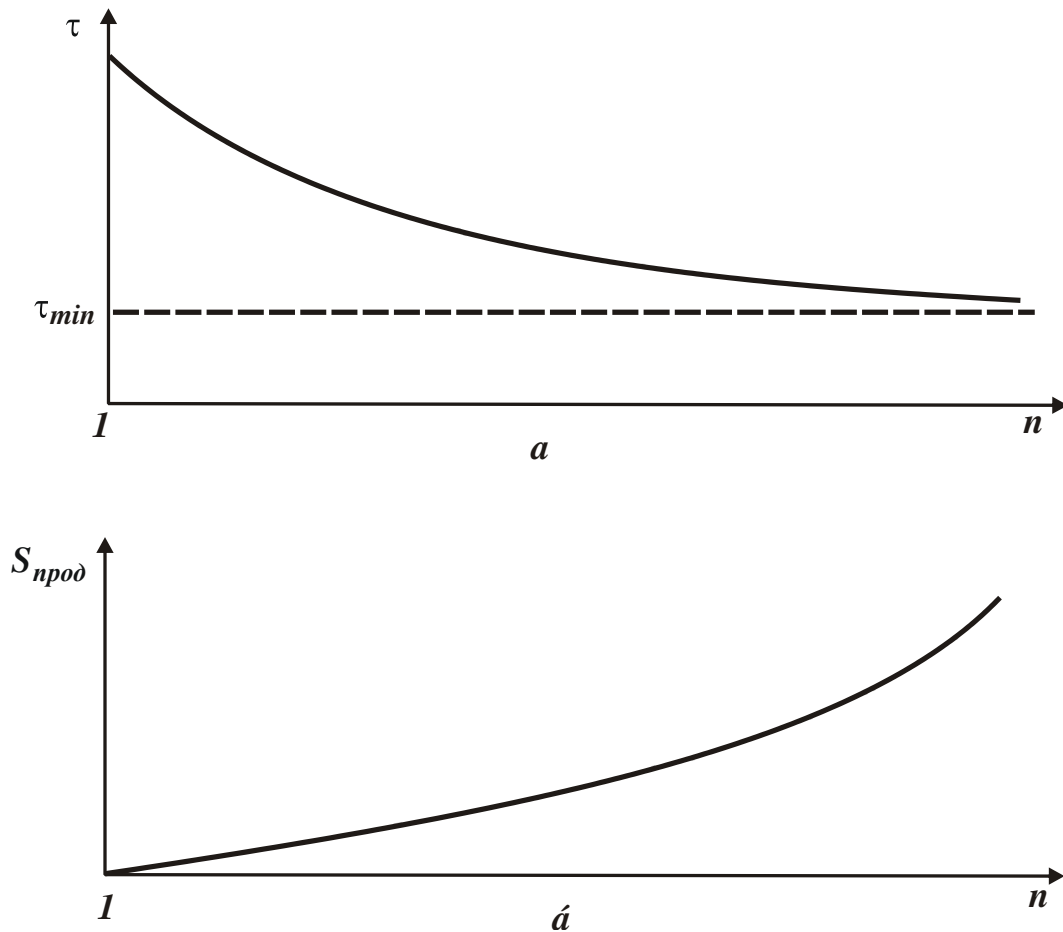


Рис. 4. Зависимости основного времени обработки τ (а) и скорости продольной подачи $S_{прод}$ (б) от количества проходов круга n при шлифовании по упругой схеме с начальным натягом в технологической системе.

Поэтому, на основе сказанного, в качестве расчетной зависимости для определения τ необходимо рассматривать зависимость (8), учитывая то, что с увеличением n и $S_{прод}$ наблюдается тенденция уменьшения τ . Расчет наименьшего основного времени обработки τ в данном случае производится следующим образом. Задается максимально возможная для рассматриваемого шлифовального станка величина $S_{прод}$. По зависимости (8) определяется необходимое количество проходов круга n , а по зависимости $\tau = n \cdot l / S_{прод}$ – основное время обработки τ .

Таким образом, получены аналитические зависимости для определения основного время обработки τ для двух схем круглого внутреннего шлифования – без продольной подачи и с продольной подачей. Естественно при этом возникает вопрос, какой из двух схем отдать предпочтение. Для ответа на данный вопрос необходимо зависимости (7) и (9) привести к одинаковой площади обрабатываемой поверхности, рассматривая зависимость (7) в виде

$$\tau = z \cdot \tau_{min} = \frac{\sigma \cdot F}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \cdot \ln \frac{y_0}{y}, \quad (10)$$

где $z = l/H$ – количество установок круга вдоль обрабатываемой цилиндрической поверхности при шлифовании без продольной подачи; l – длина обрабатываемой детали (длина обрабатываемого отверстия), м.

В результате установлено, что зависимости (9) и (10) идентичны, однако они реализуются при разном количестве проходов круга n . Лишь в этом различие двух зависимостей. Поскольку $S_{прод} \ll V_{дет}$, то применение первой схемы шлифования (без продольной подачи) позволяет обеспечить большее количество проходов n (при съеме заданного припуска y_0) и соответственно меньшее основное время обработки τ . Следовательно, за счет применения круглого внутреннего шлифования (без продольной подачи), т.е. реализуя так называемую схему шлифования последовательными врезаниями – с радиальной подачей уступами [6], появляется возможность уменьшения основного времени обработки τ и повышения производительности обработки (рис. 5). Данная схема шлифования эффективна при обработке деталей, по длине соизмеримых с высотой круга. При шлифовании деталей большей длины можно использовать как первую, так и вторую схемы. Все зависит от значений скорости детали и скорости продольной подачи, реализуемых на шлифовальном станке. Однако, в качестве наиболее предпочтительного варианта обработки следует рассматривать все же первую схему, реализующую метод шлифования последовательными врезаниями – с радиальной подачей уступами.

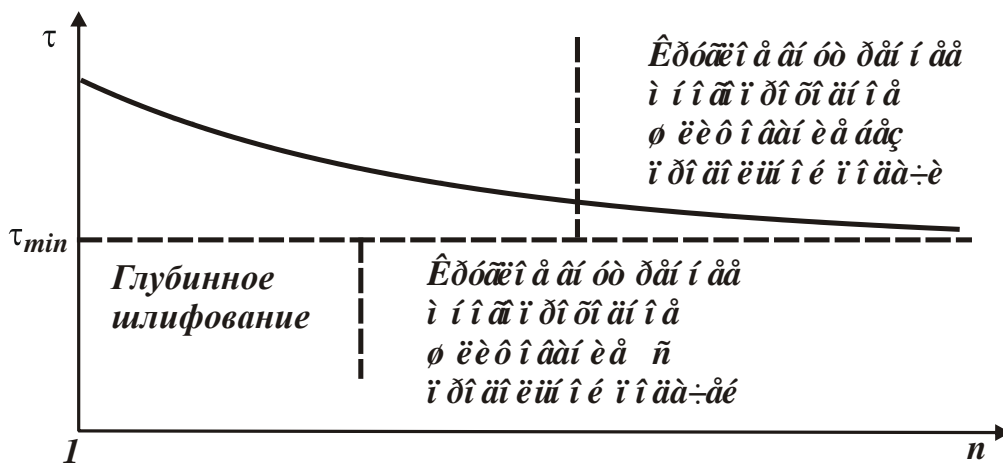


Рис. 5. Характер изменения основного времени обработки τ от количества проходов круга n при круглом внутреннем шлифовании по упругой схеме с начальным натягом в технологической системе.

Из зависимостей (9) и (10) следует, что с увеличением величины начального натяга y_0 , создаваемого в технологической системе, основное время обработки τ увеличивается, однако не столь существенно, поскольку величина y_0 является аргументом логарифмической функции. В связи с этим оценим характер изменения основного времени обработки τ при съеме припуска $\Pi = k \cdot y_0$ за счет создания в технологической системе k периодических натягов величиной y_0 . Тогда, умножая основное время обработки τ , определяемое зависимостью (10), на ко-

эффицент $k = \Pi / y_0$ с учетом того, что после съема каждого начального натяга y_0 образуется "недорез" величиной y , получим

$$\tau = \frac{\Pi}{y_0} \cdot \frac{\sigma \cdot F}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \cdot \ln \left(1 + \frac{y_0}{y} \right). \quad (11)$$

С учетом $\frac{\Pi}{y} = \frac{\Pi}{y_0} \cdot \frac{y_0}{y}$ зависимость (11) выразим через отношение y_0 / y :

$$\tau = \frac{\Pi}{y} \cdot \frac{y}{y_0} \cdot \frac{\sigma \cdot F}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \cdot \ln \left(1 + \frac{y_0}{y} \right) = \frac{\Pi}{y} \cdot \frac{\sigma \cdot F}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \cdot \alpha_1, \quad (12)$$

где $\alpha_1 = \frac{y}{y_0} \cdot \ln \left(1 + \frac{y_0}{y} \right)$ – безразмерная величина.

В результате получена аналитическая зависимость для определения наименьшего основного времени обработки τ с учетом ограничения по точности размера обрабатываемой поверхности, обусловленного упругим перемещением, возникающим в технологической системе. Это позволяет, по сути, решить задачу определения максимально возможной производительности обработки с учетом ограничения по точности размера обрабатываемой поверхности.

Как следует из зависимости (12), основное время обработки τ неоднозначно зависит от величины y_0 . Следовательно, может иметь место экстремум функции τ от величины y_0 . Для его определения подчиним функцию τ необходимому условию экстремума: $\tau'_{y_0} = 0$. После несложных преобразований получено уравнение относительно неизвестной величины y_0 / y :

$$\frac{y}{y_0} \cdot \left(1 + \frac{y_0}{y} \right) \cdot \ln \left(1 + \frac{y_0}{y} \right) = 1. \quad (13)$$

Анализ уравнения (13) показывает, что при условии $\frac{y_0}{y} \geq 1$ левая часть всегда больше правой части. Следовательно, экстремум функции τ от величины y_0 отсутствует, имеет место непрерывно изменяющаяся зависимость функции τ от величины y_0 .

Таблица 1

Расчетные значения безразмерной величины α_1

y_0 / y	1	1,25	2,5	5	10	20	100	1000
y / y_0	1	0,8	0,4	0,2	0,1	0,05	0,01	0,001
α_1	0,7	0,648	0,5	0,36	0,24	0,153	0,046	0,007

В табл. 1 приведены расчетные значения безразмерной величины α . Как видно, с увеличением отношения y_0 / y безразмерная величина α_1 непрерывно уменьшается с интенсивностью, ниже линейной зависимости. Так, при увеличении отношения y_0 / y в 1000 раз безразмерная величина α_1 уменьшилась в 100 раз. Поэтому добиться наименьшего значения основного времени обработки τ можно при

установлении величины y_0 , равной величине снимаемого припуска Π . Уменьшение величины y_0 ведет к увеличению основного времени обработки τ . На рис. 6 в обобщенном виде представлена структурная схема условий уменьшения основного времени τ при внутреннем шлифовании по упругой схеме с начальным натягом в технологической системе (по сути, по схеме выхаживания).



Рис. 6. Структурная схема условий уменьшения основного времени τ при круглом внутреннем шлифовании по упругой схеме с начальным натягом в технологической системе.

Выводы. Расчетами установлено, что при внутреннем шлифовании по упругой схеме с начальным натягом в технологической системе (т.е. по схеме выхаживания) основное время обработки с учетом ограничения по точности обрабатываемой поверхности уменьшается с увеличением количества проходов круга и скорости детали, асимптотически приближаясь к наименьшему значению. Этим доказана эффективность применения многопроходного шлифования по сравнению с однопроходным (глубинным) шлифованием. Доказано также, что данная закономерность справедлива при круглом внутреннем шлифовании, осуществляемом без продольной и с продольной подачей. В первом случае (при шлифовании последовательными врезаниями – с радиальной подачей уступа-

ми) эффект обработки достигается за счет существенного увеличения скорости детали, а во втором случае – за счет увеличения скорости продольной подачи. Учитывая то, что на шлифовальном станке можно реализовать более высокие значения скорости детали по сравнению со скоростью продольной подачи, сделан вывод об эффективности применения схемы круглого внутреннего шлифования последовательными врезаниями – с радиальной подачей уступами, т.е. без продольной подачи.

Список литературы

1. Лурье Г.Б. Прогрессивные методы круглого наружного шлифования / Г.Б. Лурье. – Л.: Машиностроение, 1984. – 103 с.
2. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования / А.В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1975. – 175 с.
3. Корчак С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей / С.Н. Корчак. – М.: Машиностроение, 1974. – 280 с.
4. Теоретические основы резания и шлифования материалов: учеб. пособие / А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков, Б.С. Серов, А.А. Якимов. – Одесса: ОГПУ, 1999. – 450 с.
5. Новиков Ф.В. Расчет и анализ закономерностей изменения величины упругого перемещения при шлифовании с течением времени обработки / Ф.В. Новиков, И.А. Рябенков // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2008. – Вып. 75. – С. 299-305.
6. Кащук В.А. Справочник шлифовщика / В.А. Кащук, А.Б. Верещагин. – М.: Машиностроение, 1988. – 480 с.