

ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ И ПАРАМЕТРОВ ОПЕРАЦИЙ ШЛИФОВАНИЯ ВАЛОВ ПРИВОДОВ ШАХТНЫХ КОНВЕЙЕРОВ

Новиков Ф.В., докт. техн. наук, Ковальчук А.Н.

(г. Харьков, Украина)

Разработан теоретический подход к оптимизации структуры и параметров операций круглого наружного шлифования по критерию наименьшего основного времени обработки с учетом ограничения по точности размера обрабатываемой поверхности

На машиностроительных предприятиях параметры точности и качества обработки деталей машин традиционно формируются на операциях окончательного шлифования. Поэтому совершенствование данных операций имеет большое научное и практическое значение. В особой мере это относится к шлифованию ответственных деталей типа вал (ступенчатых валов, валов–шестерней и т.д.) приводов шахтных конвейеров – планетарных редукторов мощностью более 200 кВт, изготавливаемых из низкоуглеродистых легированных сталей, закаленных до твердости HRC 62–65. Данные детали работают в условиях больших нагрузок и к ним предъявляются высокие требования по точности и качеству обработки. Например, точность размера ступени вала диаметром 200 мм – в пределах 0,002...0,008 мм, а шероховатость обработки – $R_a=0,2$ мкм. Это вызывает значительные трудности их обработки как с точки зрения стабильного обеспечения заданной точности и шероховатости, так и увеличения производительности обработки, поскольку применяемые операции круглого врезного и продольного шлифования характеризуются достаточно высокой трудоемкостью в связи с возникновением в технологической системе значительных упругих перемещений. В настоящее время благодаря усилиям многих ученых в научно-технической литературе [1, 2] сложилось достаточно полное представление о закономерностях формирования параметров точности и шероховатости обработки при шлифовании, разработаны эффективные автоматизированные высокопроизводительные циклы круглого наружного шлифования, позволяющие уменьшить отрицательную роль упругих перемещений в процессе обработки. Вместе с тем, отсутствуют аналитические решения об оптимальных структурах операций (или циклов) шлифования, учитывающие упругие свойства технологической системы, что не позволяет выявить, обосновать и реализовать их потенциальные возможности. Это требует проведения комплекса исследований по выбору оптимальной структуры и параметров операций круглого наружного шлифования ответственных валов приводов шахтных конвейеров. В связи с этим, на основе решений [3, 4] разработан теоретический подход к оптимизации структуры и параметров операций круглого наружного врезного шлифования по критерию наименьшего основного времени обработки с учетом ограничения по точности размера обрабатываемой по-

верхности. Для этого рассмотрены три принципиальные схемы круглого наружного врезного шлифования (рис.1): с дискретно изменяющейся во времени скоростью радиальной подачи и с дискретным характером контакта круга с обрабатываемой деталью; с непрерывно изменяющейся во времени скоростью радиальной подачи и с постоянным контактом круга с обрабатываемой деталью; с дискретно изменяющейся во времени скоростью радиальной подачи и с постоянным контактом круга с обрабатываемой деталью. Установлено, что в первом случае при шлифовании в n переходов основное время обработки τ определяется:

$$\begin{aligned} \tau &= \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \dots + \tau_n = \frac{\Pi_1}{V_1} + \frac{\Pi_2 + \delta_1}{V_2} + \frac{\Pi_3 + \delta_2}{V_3} + \dots + \frac{\Pi_n + \delta_{n-1}}{V_n} = \\ &= B \cdot \left(\frac{\Pi_1}{\delta_1} + \frac{\Pi_2 + \delta_1}{\delta_2} + \frac{\Pi_3 + \delta_2}{\delta_3} + \dots + \frac{\Pi_n + \delta_{n-1}}{\delta_n} \right), \end{aligned} \quad (1)$$

где τ_n , Π_n , V_n , $\delta_n = B \cdot V_n$ – соответственно основное время обработки, величина снимаемого припуска, скорость радиальной подачи и величина упругого перемещения, возникающего в технологической системе, на n -ном переходе;

$\Pi_1 + \Pi_2 + \Pi_3 + \dots + \Pi_n = \Pi$ – суммарный припуск, м; $B = \frac{\sigma \cdot F}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}$ – постоянная

времени образования упругого перемещения в технологической системе, с; σ – условное напряжение резания при шлифовании, Н/м²; c – приведенная жесткость технологической системы в радиальном направлении, Н/м; $K_{ш}$ – коэффициент шлифования, равный отношению тангенциальной P_z и радиальной P_y составляющих силы резания; $V_{кр}$ – скорость круга, м/с; $F = \pi \cdot D_{дет} \cdot H$ – площадь обрабатываемой поверхности, м²; $D_{дет}, H$ – соответственно диаметр детали и высота круга, м.

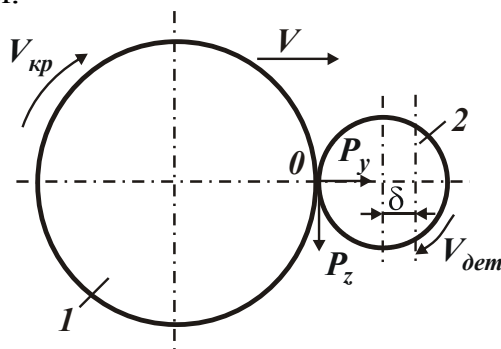


Рис. 1. Расчетная схема круглого врезного шлифования: 1 – круг; 2 – деталь.

Из зависимости (1) следует бесконечное множество экстремумов (минимумов) основного времени обработки τ от величин упругих перемещений $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \dots, \delta_{n-1}$, возникающих в технологической системе на каждом переходе, а также то, что наименьшее значение τ достигается при условии $\Pi_1 = \Pi$; $\Pi_2 = \Pi_3 = \dots = \Pi_n = 0$. Подчиняя функцию τ необходимому условию экстремума, т.е. $\tau'_{\delta_1} = 0$, установлено, например, что при шлифовании в два перехода экс-

тремальные значения основного времени обработки τ_{min} и упругого перемещения на первом переходе δ_1 (рис. 2,а) определяются зависимостями:

$$\tau_{min} = B \cdot \left[\sqrt{\frac{\Pi_1}{\delta_2}} + \sqrt{\frac{\Pi_1}{\delta_2}} + \frac{(\Pi - \Pi_1)}{\delta_2} \right], \quad \delta_1 = \sqrt{\Pi_1 \cdot \delta_2} . \quad (2)$$

При этом наибольшее и наименьшее значения основного времени обработки отличаются в 5 раз (рис. 2,б), что свидетельствует о важности исследования функции τ на экстремум и определения экстремальных значений параметров шлифования.

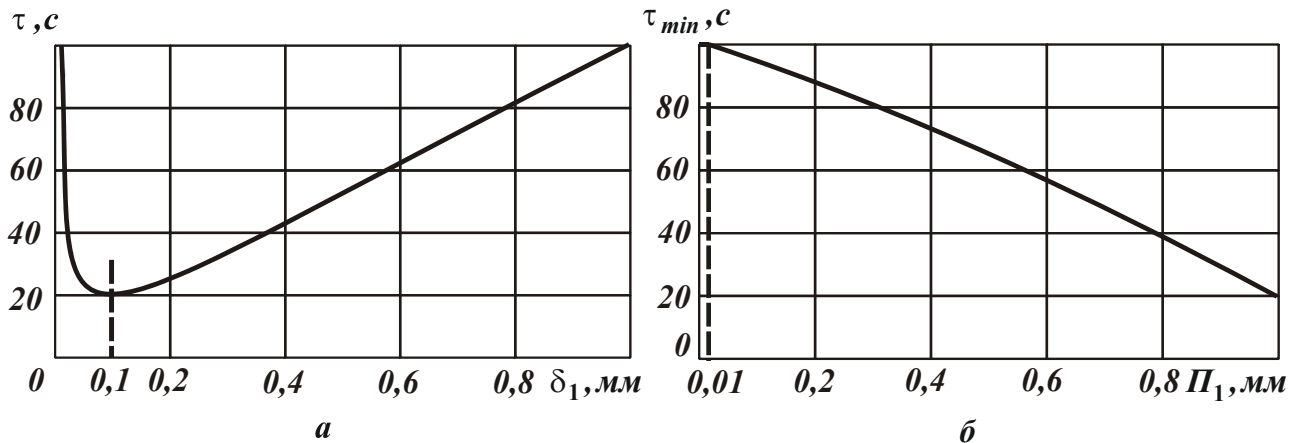


Рис. 2. Зависимость τ от δ_1 для $B=1$ с, $\Pi_1=\Pi=1$ мм, $\delta_2=0,01$ мм (а) и зависимость τ_{min} от Π_1 для $B=1$ с, $\Pi=1$ мм, $\delta_2=0,01$ (б).

При шлифовании в n переходов экстремальное (минимальное) значение τ_{min} равно:

$$\tau_{min} = B \cdot n \cdot \varepsilon_{сум}^{1/n} , \quad (3)$$

где $\varepsilon_{сум} = \Pi / \delta_n$ – суммарное уточнение на размер обрабатываемой поверхности.

При этом доказано, что по длительности все переходы одинаковы: $\tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_n = B \cdot \varepsilon_{сум}^{1/n}$. Следовательно, отношение величин упругих перемещений, возникающих на предшествующем и последующем переходах и определяющее уточнение на размер обрабатываемой поверхности ε_n , одинаково для каждого перехода и равно $\varepsilon_n = \varepsilon_{сум}^{1/n}$. Это означает, что с каждым последующим переходом величины упругого перемещения и соответственно скорости радиальной подачи убывают по геометрической прогрессии со знаменателем, обратно пропорциональным уточнению ε_n :

$$\varepsilon_n = \frac{\delta_1}{\delta_2} = \frac{\delta_2}{\delta_3} = \dots = \frac{\delta_{n-1}}{\delta_n} = \varepsilon_{сум}^{1/n}; \quad \varepsilon_n = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_2}{V_3} = \dots = \frac{V_{n-1}}{V_n} = \varepsilon_{сум}^{1/n} . \quad (4)$$

Исходя из зависимости (3) установлено, что функция τ_{min} от числа переходов n имеет экстремум (минимум, рис. 3), который достигается при условии:

$$n = \ln \varepsilon_{сум} \quad \text{или} \quad \varepsilon_{сум} = e^n . \quad (5)$$

Как видно, экстремальное (оптимальное) число переходов n определяется лишь суммарным уточнением $\varepsilon_{\text{сум}}$, а на каждом переходе реализуется оптимальное уточнение ε_n , равное числу $e \approx 2,72$. Следовательно, знаменателем убывающей геометрической прогрессии является величина $1/e \approx 0,36$ и справедливы соотношения, вытекающие из зависимостей (4):

$$\frac{\delta_1}{\delta_2} = \frac{\delta_2}{\delta_3} = \dots = \frac{\delta_{n-1}}{\delta_n} = e; \quad \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_2}{V_3} = \dots = \frac{V_{n-1}}{V_n} = e. \quad (6)$$

Наименьшее основное время обработки при этом равно:

$$(\tau_{\min})_{\min} = B \cdot \ln \varepsilon_{\text{сум}} \cdot e. \quad (7)$$

Очевидно, уменьшить $(\tau_{\min})_{\min}$ можно за счет уменьшения параметра B .

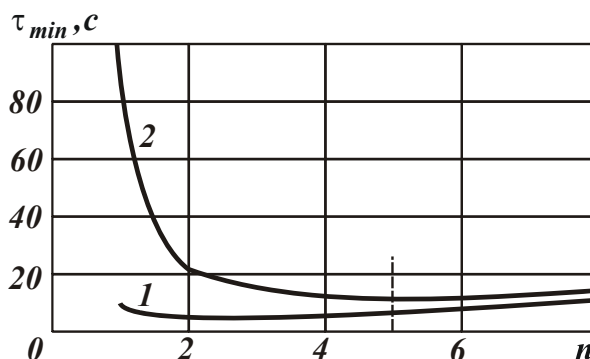


Рис. 3. Зависимость τ_{\min} от n для разных значений $\varepsilon_{\text{сум}}$: 1 – $\varepsilon_{\text{сум}}=10$; 2 – $\varepsilon_{\text{сум}}=100$ ($B=1\text{с}$).

Таблица 1

Расчетные значения $\varepsilon_{\text{сум}}$ и $(\tau_{\min})_{\min}$ в зависимости от числа переходов n ($B=1\text{с}$)

n	1	2	3	4	5	6	7	8
$\varepsilon_{\text{сум}}$	2,72	7,4	20,1	54,7	148,9	405	1101	3000
$(\tau_{\min})_{\min}$	2,72	5,4	8,1	10,8	13,6	16,3	19,0	21,7

Как следует из табл. 1, с увеличением суммарного уточнения $\varepsilon_{\text{сум}}$ количество переходов n увеличивается, однако не существенно. Например, в диапазоне изменения $\varepsilon_{\text{сум}}=2,72\dots 54,7$ (что имеет место на практике) количество переходов n изменяется в диапазоне $1\dots 4$. Данный вывод справедлив и в случае, если рассматривать вместо переходов операции.

Полученная выше аналитическая зависимость $n = \ln \varepsilon_{\text{сум}}$ согласуется с известной и широко применяемой на практике аналогичной эмпирической зависимостью для определения количества операций или переходов при обработке конкретной поверхности:

$$k_j = \frac{\lg \varepsilon_{d0}}{a} \quad \text{или} \quad \varepsilon_{d0} = 10^{a \cdot k_j} \approx 3,1^{k_j}, \quad (8)$$

где a – коэффициент ($a=0,45-0,5$); $\varepsilon_{d0} = Td_{заг} / Td_{дет}$ – суммарное уточнение; $Td_{заг}$, $Td_{дет}$ – допуски соответственно на размер заготовки и готовой детали.

Из зависимости (1) вытекает, что уменьшить основное время обработки τ можно также за счет исключения величин $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \dots, \delta_{n-1}$ из числителей всех слагаемых. Это достигается применением схемы круглого наружного врезного шлифования с постоянным во времени контактом круга с обрабатываемой деталью и с непрерывно изменяющейся скоростью радиальной подачи, описываемой дифференциальным уравнением:

$$-\frac{d\tau}{B} = \frac{dV}{V}, \quad (9)$$

где V – средняя скорость радиальной подачи на “условном” переходе; $d\tau$ – время “условного” перехода.

Решение дифференциального уравнения (9) с учетом начального условия $\delta(\tau=0) = \delta_1$, где δ_1 – начальный натяг в технологической системе:

$$V = \frac{\delta_1}{B} \cdot e^{-\frac{\tau}{B}}, \quad \delta = \delta_1 \cdot e^{-\frac{\tau}{B}}. \quad (10)$$

В отличие от шлифования с дискретно изменяющейся во времени скоростью радиальной подачи, когда упругое перемещение и скорость радиальной подачи подчиняются закону убывающей геометрической прогрессии, при шлифовании с непрерывно изменяющейся во времени скоростью радиальной подачи эти величины подчиняются экспоненциальному закону. При этом установлено, что минимум основного времени обработки τ_{min} достигается при условии создания в технологической системе начального натяга, равного величине снимаемого припуска $\delta_1 = \Pi$:

$$\tau_{min} = B \cdot \ln \varepsilon_{сум}. \quad (11)$$

Сравнивая зависимости (7) и (11) для определения минимума основного времени обработки τ_{min} , видно, что они отличаются лишь числом e , т.е. при шлифовании с непрерывно изменяющейся во времени скоростью радиальной подачи производительность больше в 2,72 раза. Если в технологической системе нельзя создать начальный натяг δ_1 , равный величине снимаемого припуска Π , то круглое врезное шлифование следует выполнить в два перехода. Первый переход – с постоянной скоростью радиальной подачи $V_1 = B \cdot \delta_1$, а второй переход – с переменной скоростью V , определяемой зависимостью (10). Тогда основное время обработки τ выразится:

$$\tau = \frac{\Pi}{V_1} - B \cdot \ln \frac{\delta}{\delta_1} = B \cdot \left(m - \ln m + \ln \frac{\Pi}{\delta} \right). \quad (12)$$

Расчетные значения τ (в секундах) для $B=1с$

m	e^0	e^1	e^2	e^3	e^4	e^5	e^6	e^7
$\tau(\Pi/\delta=e^2)$	3,0	3,72	7,4	19,2	52,7	145,9	341	1097
$\tau(\Pi/\delta=e^4)$	5,0	5,72	9,4	21,2	54,7	147,9	343	1099
$\tau(\Pi/\delta=e^6)$	7,0	7,72	11,4	23,2	56,7	149,9	345	1101

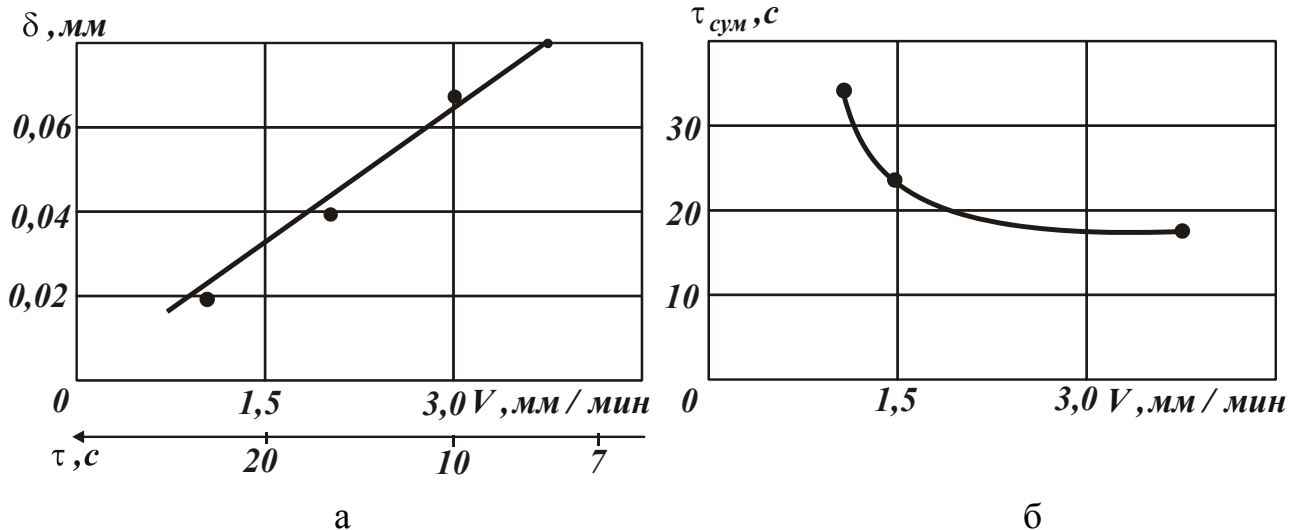


Рис. 4. Зависимости величин δ (а) и $\tau_{\text{сум}}$ (б) от скорости радиальной подачи V при круглом врезном шлифовании: круг – 1А1 400х80х203 24А 40 СМ1 К6; обр. мат. – сталь 45; $V_{кр}=35$ м/с; $V_{дет}=13,2$ м/мин.

Здесь величина δ определяет точность размера обрабатываемой поверхности, и она задана, а $m = \Pi / \delta_1$ – переменная величина, изменяющаяся в пределах $1 \dots \infty$. Из зависимости (12) следует, что уменьшить τ можно за счет уменьшения $m \rightarrow 1$, табл. 2. Отношение установленного значения m к значению $m=1$ позволяет количественно оценить во сколько раз основное время обработки τ больше минимально возможного значения τ_{min} , т.е. на сколько эффективна применяемая схема круглого врезного шлифования в два перехода. Например, для $\Pi=0,5$ мм, $\delta=0,008$ мм, $\delta_1=0,02$ мм, имеем $\Pi/\delta=e^4$, $m = \Pi/\delta_1 \approx e^3$. Исходя из табл. 2, в этом случае τ равно 21,2с, а минимальное основное время обработки τ_{min} (при $m=e^0=1$) равно 5с. Соответственно их отношение равно 4. Этим показано, что для данной технологической системы наиболее эффективной схемой круглого врезного шлифования является схема, включающая переходы черного шлифования и выхаживания. По сравнению с оптимальной схемой обработки, реализующей лишь переход выхаживания и обеспечивающей минимум основного времени обработки, данная схема в 4 раза менее производительна. Это обусловлено достаточно большими значениями Π/δ и $m = \Pi/\delta_1$. Полученные теоретические решения хорошо согласуются с

экспериментальными данными, приведенными на рис. 4. Так экспериментально установлено, что параметр $B = \delta / V$ не зависит от скорости радиальной подачи V при круглом врезном шлифовании и изменяется в пределах $1,2 \dots 1,28$ с, т.е. в первом приближении параметр B можно рассматривать постоянной величиной. Установлено также, что с увеличением V суммарное основное время обработки $\tau_{\text{сум}}$ на переходах чернового шлифования и выхаживания (при заданной точности размера обработанной поверхности) уменьшается. Это связано с увеличением величины упругого перемещения в начале перехода выхаживания.

На основе разработанного теоретического подхода к оптимизации структуры и параметров операций круглого наружного врезного и продольного шлифования произведен выбор наиболее эффективной операции. Для этого проведен анализ операции круглого врезного шлифования с дискретно изменяющейся во времени скоростью радиальной подачи и постоянным контактом круга с обрабатываемой деталью по основному времени обработки τ :

$$\tau = B \cdot \left(\frac{\Pi}{\delta_1} + \frac{\delta_1}{\delta_2} + \frac{\delta_2}{\delta_3} + \dots + \frac{\delta_{n-1}}{\delta_n} - n \right), \quad (13)$$

где $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \dots, \delta_n$ – упругие перемещения, возникающие в технологической системе соответственно на первом, втором, третьем и n -ном переходах, м.

Подчиняя функцию τ условию экстремума от переменных $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \dots, \delta_{n-1}$, получено экстремальное (минимальное) значение τ_{min} :

$$\tau_{\text{min}} = n \cdot B \cdot (\varepsilon_{\text{сум}}^{1/n} - 1). \quad (14)$$

При этом установлено, что справедливо условие $\tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_n = B \cdot (\varepsilon_{\text{сум}}^{1/n} - 1)$. Следовательно, отношение величин упругих перемещений, возникающих на предшествующем и последующем переходах и определяющее уточнение на размер обрабатываемой поверхности ε_n , одинаково для каждого перехода и равно $\varepsilon_n = \varepsilon_{\text{сум}}^{1/n}$. Поэтому, с каждым последующим переходом величины упругого перемещения и соответственно скорости радиальной подачи убывают по геометрической прогрессии со знаменателем, обратно пропорциональным уточнению ε_n .

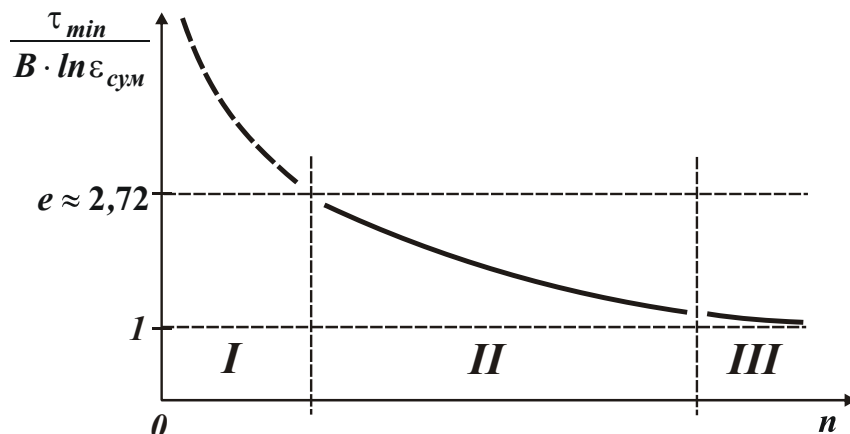
Таблица 3

Расчетные значения τ_{min} для $B=1$ с и $\varepsilon_{\text{сум}}=100$

n	1	2	3	4	5	6	10	20
τ_{min}	99,0	18,0	10,8	8,6	7,5	6,9	6,0	5,4

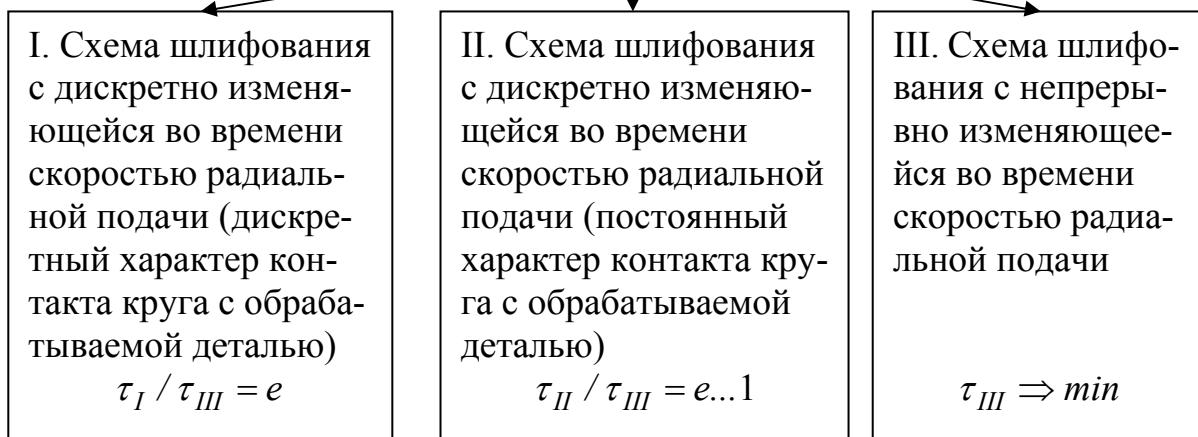
Установлено, что функция τ_{min} , в отличие от аналогичной функции $\tau_{\text{сум}}$, описываемой зависимостью (2), не имеет экстремума от количества переходов n , табл. 3. Она непрерывно уменьшается с увеличением n (рис. 5), асимптотически приближаясь к значению $\tau_{\text{min}} = B \cdot \ln \varepsilon_{\text{сум}}$, определяемому зависимостью

(9) для схемы круглого наружного врезного шлифования с непрерывно изменяющейся во времени скоростью радиальной подачи и постоянным контактом круга с обрабатываемой деталью, т.е. при $n \rightarrow \infty$ схемы (II) и (III) равносильны.



а

Основные схемы круглого врезного шлифования



б

Рис. 5. Зависимость функции $\tau_{min} / B \cdot \ln \varepsilon_{сум}$ от количества переходов n (а) и классификация основных схем круглого врезного шлифования (б).

При небольшом количестве переходов $n=1 \dots 4$ зависимости (3) и (14) фактически идентичны и подчиняются зависимости (7). Поэтому с увеличением n , по сути, имеет место переход от схемы (I) круглого врезного шлифования с дискретно изменяющейся во времени скоростью радиальной подачи (и дискретным характером контакта круга с обрабатываемой деталью) к рассматриваемой выше схеме шлифования (II). Следовательно, схема (II) по продолжительности обработки занимает промежуточное положение между схемами (I) и (III), рис. 5,а. Функция $\tau_{min} / B \cdot \ln \varepsilon_{сум}$ уменьшается от $e \approx 2,72$ до 1 (при $n \rightarrow \infty$), т.е. применение схемы (II) круглого врезного шлифования с дискретно изменяющейся во времени скоростью радиальной подачи и постоянным контактом круга с обрабатываемой деталью позволяет уменьшить основное время обработки.

На основе сказанного, предложена классификация схем круглого наружного врезного шлифования, рис. 5,б.

В работе проведена аналитическая оптимизация структуры и параметров операции круглого продольного шлифования (включающего два перехода: черновое шлифование и выхаживание) на основе полученной аналитической зависимости для определения минимального основного времени обработки τ_{min} и значений скорости продольной подачи $S_{прод1}, \dots, S_{продn}$ на разных проходах:

$$\tau_{min} = n \cdot B \cdot \frac{l_{дет}}{H} \cdot \left(\varepsilon_{сум}^{\frac{1}{n}} - 1 \right); \quad S_{прод1} = \dots = S_{продn} = \frac{H}{B \cdot \left[\varepsilon_{сум}^{\frac{1}{n}} - 1 \right]}, \quad (15)$$

где $l_{дет}$ – длина обрабатываемой детали, м; H – высота круга, м.

Установлено, что τ_{min} тем меньше, чем больше скорость продольной подачи и количество проходов круга при выхаживании, а также чем меньше количество проходов при черновом шлифовании. При этом доказано, что скорость продольной подачи $S_{прод}$ необходимо на всех n проходах (включая черновое шлифование и выхаживание) устанавливать одинаковой, максимально достижимой для данного станка. Это хорошо согласуется с практикой применения круглого продольного и плоского шлифования и свидетельствует о достоверности полученных теоретических результатов.

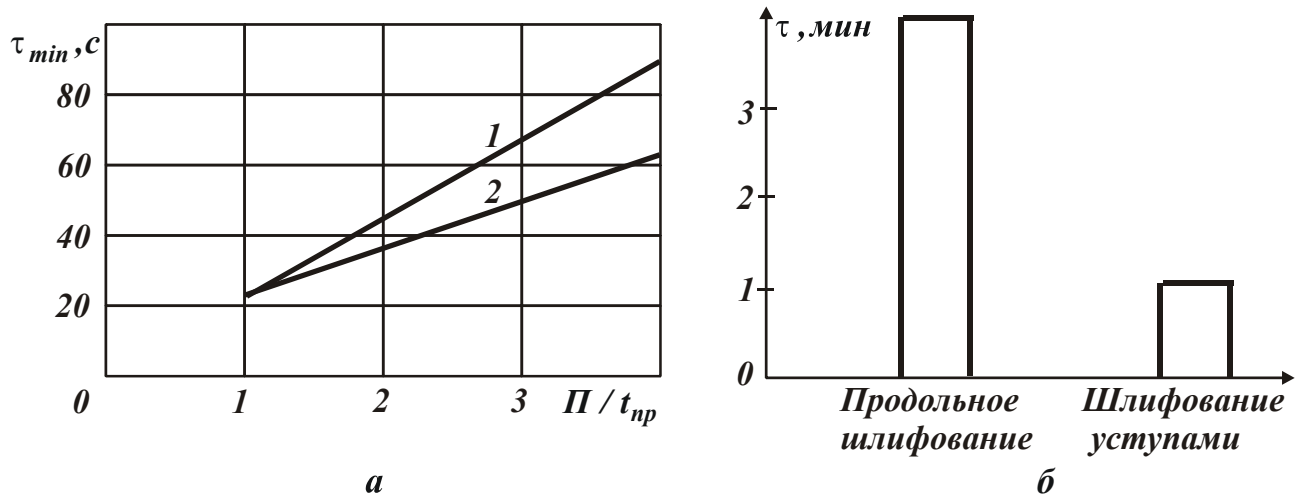


Рис. 6. Зависимости τ_{min} от $\Pi / t_{нр}$ для круглого продольного (1) и врезного (2) шлифования (а) и диаграмма распределения основного времени обработки τ для круглого продольного шлифования и шлифования последовательными врезаниями – с радиальной подачей уступами (б): круг – 1А1 400x80x203 24А 40 СМ1 К6; обр. материал – сталь 45; $V_{кр} = 35$ м/с; $V_{дет} = 13,2$ м/мин.

Произведено сравнение основного времени обработки τ_{min} при круглом наружном продольном и врезном шлифовании по зависимостям:

$$\tau_{min_{np}} = m \cdot n \cdot B \cdot \frac{l_{дет}}{H} \cdot \left(\varepsilon_{сум}^n - 1 \right); \quad \tau_{min_{вр}} = n \cdot B \cdot \frac{l_{дет}}{H} \cdot \left[\left(m \cdot \varepsilon_{сум} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right], \quad (16)$$

где $m = \Pi / t_{np}$ – количество проходов круга; t_{np} – предельная глубина шлифования, м; $\varepsilon_{сум} = t_{np} / \delta_n$.

Установлено, что при одинаковой заданной точности размера обрабатываемой поверхности, определяемой величиной δ_n , применение схемы круглого наружного врезного шлифования позволяет уменьшить основное время обработки, рис. 6,а. Следовательно, при обработке цилиндрических поверхностей следует рекомендовать шлифование последовательными врезаниями – с радиальной подачей уступами, как наиболее производительную схему. Это хорошо согласуется с полученными экспериментальными данными, рис. 6,б.

Разработана математическая модель определения параметров точности обработки на операции круглого врезного шлифования на основе учета баланса перемещений в технологической системе. Для этого были составлены уравнения баланса перемещений в технологической системе соответственно на переходах чернового шлифования и выхаживания:

$$\frac{dV(\tau)}{d\tau} + \frac{1}{B} \cdot V(\tau) = \frac{1}{B} \cdot V_0, \quad (17)$$

$$\frac{dV(\tau)}{d\tau} + \frac{1}{B} \cdot V(\tau) = 0, \quad (18)$$

где τ – время обработки, с; $V(\tau)$ – линейная скорость съема припуска, м/с; V_0 – скорость радиальной подачи шлифовального круга, м/с; $B = \frac{\sigma}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \cdot F$ –

постоянная времени образования упругого перемещения в технологической системе, с; σ – условное напряжение резания при шлифовании, Н/м²; $K_{ш} = P_z / P_y$ – коэффициент шлифования, равный отношению тангенциальной P_z и радиальной P_y составляющих силы резания; c – приведенная жесткость технологической системы в радиальном направлении, Н/м; $V_{кр}$ – скорость круга, м/с; $F = \pi \cdot D_{дет} \cdot H$ – площадь обрабатываемой поверхности, м²; $D_{дет}$, H – соответственно диаметр и длина обрабатываемой детали, м.

Решение дифференциального уравнения (17):

$$V(\tau) = V_0 \cdot \left(1 - e^{-\frac{1}{B} \cdot \tau} \right); \quad \delta(\tau) = B \cdot V_0 \cdot \left(1 - e^{-\frac{1}{B} \cdot \tau} \right) = \delta_{уст} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\Pi}{\delta_{уст}}} \right), \quad (19)$$

где $\delta(\tau)$ – величина упругого перемещения, возникающего в технологической системе, м; $\delta_{уст} = B \cdot V_0$ – величина упругого перемещения, возникающего в технологической системе в установившемся во времени процессе шлифования, м; $\Pi = V_0 \cdot \tau$ – текущее значение снимаемого припуска, м.

Решение дифференциального уравнения (18):

$$V(\tau) = \frac{\delta_1}{B} \cdot e^{-\frac{1}{B} \cdot \tau}; \quad \delta(\tau) = \delta_1 \cdot e^{-\frac{1}{B} \cdot \tau}, \quad (20)$$

где δ_1 – натяг в технологической системе в начале перехода выхаживания, м.

Величина упругого перемещения $\delta(\tau)$ определяет точность размера обрабатываемой поверхности. Как видно, на переходе черного шлифования $\delta(\tau)$ увеличивается, а на переходе выхаживания – уменьшается с течением времени обработки τ . Это свидетельствует о том, что выполнение операции круглого наружного шлифования в два перехода (черновое шлифование и выхаживание) обеспечивает заданную точность размера обрабатываемой поверхности. При этом доказано, что при выполнении условия $\delta_1 / \Pi = 0,05 \dots 1,0$ реализуется максимально возможная производительность обработки с учетом ограничения по точности размера обрабатываемой поверхности (где Π – величина снимаемого припуска, м).

Получены аналитические зависимости для установления величины $\delta_1 - \delta_2$, определяющей погрешность формы обрабатываемой детали, соответственно на переходах черного шлифования и выхаживания:

$$\delta_1 - \delta_2 = B \cdot V_0 \cdot e^{-\frac{1}{B} \cdot \tau} \cdot \left(e^{\frac{1}{B} \cdot \tau \phi} - 1 \right); \quad \delta_1 - \delta_2 = (\delta_{1нач} - \delta_{2нач}) \cdot e^{-\frac{1}{B} \cdot \tau}, \quad (21)$$

где τ_ϕ – время съема припуска, равного величине исходной погрешности формы обрабатываемой детали на переходе черного шлифования, с; $(\delta_{1нач} - \delta_{2нач})$ – исходная погрешность формы обрабатываемой детали на переходе выхаживания, м.

Доказано, что с течением времени обработки τ величина $\delta_1 - \delta_2$ на двух переходах уменьшается, причем, более интенсивно на переходе выхаживания. Получены также аналитические зависимости для определения суммарного уточнения $\varepsilon_{сум}$ соответственно на переходах черного шлифования и выхаживания:

$$\varepsilon = \frac{\delta_1(\tau_\phi)}{(\delta_1 - \delta_2)} = e^{\frac{1}{B}(\tau - \tau_\phi)}; \quad \varepsilon = \frac{(\delta_{1нач} - \delta_{нач})}{(\delta_1 - \delta_2)} = e^{\frac{1}{B} \cdot \tau}. \quad (22)$$

Как видно, за счет увеличения времени обработки τ или $(\tau - \tau_\phi)$ до значений, превышающих в несколько раз параметр B , можно реализовать значительные величины суммарного уточнения $\varepsilon_{сум}$, рис. 7. Из этого сделан вывод о необходимости уменьшения параметра B с целью уменьшения припуска, оставляемого для исправления погрешности формы обрабатываемой детали, и снижения основного времени обработки.

Теоретически показано, что полученные аналитические зависимости для определения суммарного уточнения $\varepsilon_{сум}$ справедливы как для шлифования, так и для других методов механической обработки, в частности, точения. Их отличие состоит лишь в том, что при шлифовании параметр B определяется скоро-

стью круга, а при точении – скоростью детали. В связи с этим, обоснованы пути уменьшения параметра B при шлифовании и точении, а также определены условия, при которых при точении параметр B может быть меньше, чем при шлифовании. Они состоят в уменьшении силовой напряженности процесса обработки и увеличении скорости детали до значений, соизмеримых со скоростью круга при шлифовании.

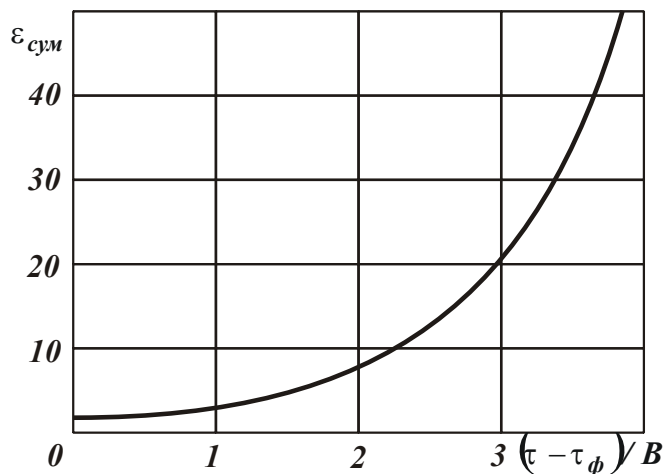


Рис. 7. Зависимость $\varepsilon_{сум}$ от $(\tau - \tau_\phi) / B$.

Проведены теоретические и экспериментальные исследования шероховатости поверхности при круглом наружном шлифовании. Теоретически установлено, что одним из основных условий уменьшения шероховатости поверхности при шлифовании является увеличение числа одновременно работающих зерен круга. Это достигается применением абразивных (алмазных) инструментов с примерно одновысотным выступанием зерен над уровнем связки, например, шлифовальных кругов, обеспечивающих “утопание” режущих зерен в связку при шлифовании, и созданием площадок на вершинах режущих зерен кругов (созданием плосковершинных зерен). В связи с этим разработана математическая модель формирования площадок на режущих зернах круга под воздействием механической нагрузки. На основе фундаментального решения теории упругости определены напряжения, возникающие в режущем зерне, имеющем форму клина, и показан характер разрушения зерна. С использованием методов сопротивления материалов получено упрощенное решение для определения размера площадки на зерне от действия сосредоточенной силы, равной силе резания. Установлено, что на зерне образуется площадка, наклоненная под небольшим углом к направлению действия тангенциальной составляющей силы резания, а режущая часть зерна принимает форму, близкую к симметричной.

Экспериментально установлено, что при круглом продольном шлифовании шероховатость поверхности меньше, чем при круглом врезном шлифовании, рис.8. Применение абразивного круга более высокой твердости (СТ1) по сравнению с кругом твердостью СМ1 позволяет уменьшить шероховатость поверхности, что связано с образованием на режущих зернах в процессе правки больших площадок. Однако, данный круг достаточно быстро теряет режущую

способность вследствие засаливания и его необходимо часто править, что существенно повышает трудоемкость обработки и расход круга. Поэтому для осуществления операций круглого наружного шлифования валов эффективнее использовать абразивный круг твердостью СМ1, работающий в режиме самозатачивания. Он обеспечивает повышение производительности обработки при одновременном выполнении требований по точности и шероховатости обрабатываемых поверхностей валов.

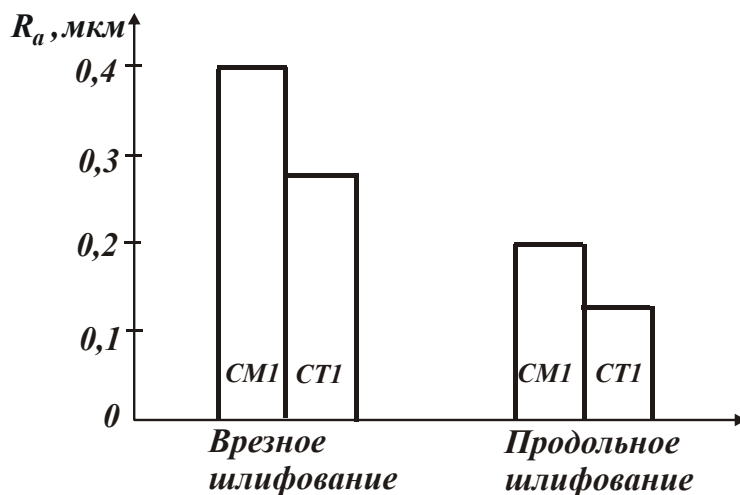


Рис. 8. Диаграмма распределения значений параметра шероховатости обработки R_a при круглом наружном врезном и продольном шлифовании абразивными кругами твердостью СМ1 и СТ1.

Обоснованы условия практического использования полученных результатов на операциях круглого наружного шлифования ответственных валов приводов шахтных конвейеров. Установлено, что применение схемы шлифования последовательными врезаниями – с радиальной подачей уступами и реализующих ее оптимальных параметров обработки (полученных из условия $\delta_1 / \Pi = 0,05 \dots 1,0$) на операциях круглого наружного шлифования взамен применявшейся ранее схемы круглого продольного шлифования позволило более чем в два раза повысить производительность обработки при гарантированном обеспечении требуемых высоких показателей точности и шероховатости обрабатываемых поверхностей. При этом исключаются прижоги и другие температурные дефекты, твердость обработанных поверхностей валов соответствует их твердости до обработки, что свидетельствует о незначительном влиянии температурного фактора. Применение разработанных операций круглого наружного шлифования позволило уменьшить процент исправимого брака обрабатываемых валов приводов шахтных конвейеров и на 25% снизить расход абразивных кругов. Экономический эффект от внедрения в основное производство ОАО Харьковский машиностроительный завод “Свет шахтера” разработанных операций круглого наружного шлифования ответственных валов приводов шахтных конвейеров составил 145624 гривен в год.

Список литературы:

1. Лурье Г.Б. Шлифование металлов. – М.: Машиностроение, 1969. – 197 с.
2. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 7. "Точность обработки деталей машин" – Одесса: ОНПУ, 2004. – 546 с.
3. Новиков Ф.В., Ковальчук А.Н. Оптимизация структуры процесса съема припуска при механической обработке // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Х.: НТУ "ХПІ". – 2005. – № 37. – С. 169-176.
4. Ковальчук А.Н. Исследование параметров точности обработки при круглом врезном шлифовании // Труды 13-й Международной научно-технической конференции. Физические и компьютерные технологии. – Х.: ХНПК "ФЭД". – 2007. – С. 236-247.