

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

ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ И ПАРАМЕТРОВ ОПЕРАЦИЙ ШЛИФОВАНИЯ ВАЛОВ ПРИВОДОВ ШАХТНЫХ КОНВЕЙЕРОВ

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. Вместе с тем, фактически отсутствуют аналитические решения об оптимальных структурах операций шлифования, учитывающие упругие свойства технологической системы, что не позволяет выявить, обосновать и реализовать их потенциальные возможности.

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 поверхности. Установлено, что при круглом наружном врезном шлифовании (рис. 1) с дискретно изменяющейся во времени скоростью радиальной подачи в n переходов основное время обработки τ определяется:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \dots + \tau_n = B \cdot \left(\frac{P_1}{\delta_1} + \frac{P_2 + \delta_1}{\delta_2} + \frac{P_3 + \delta_2}{\delta_3} + \dots + \frac{P_n + \delta_{n-1}}{\delta_n} \right), \quad (1)$$

где τ_n , P_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.

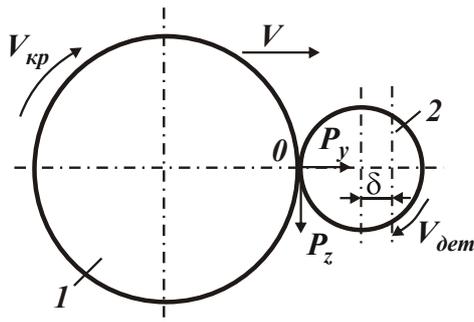


Рис. 1. Расчетная схема круглого врезного шлифования: 1 – круг; 2 – деталь.

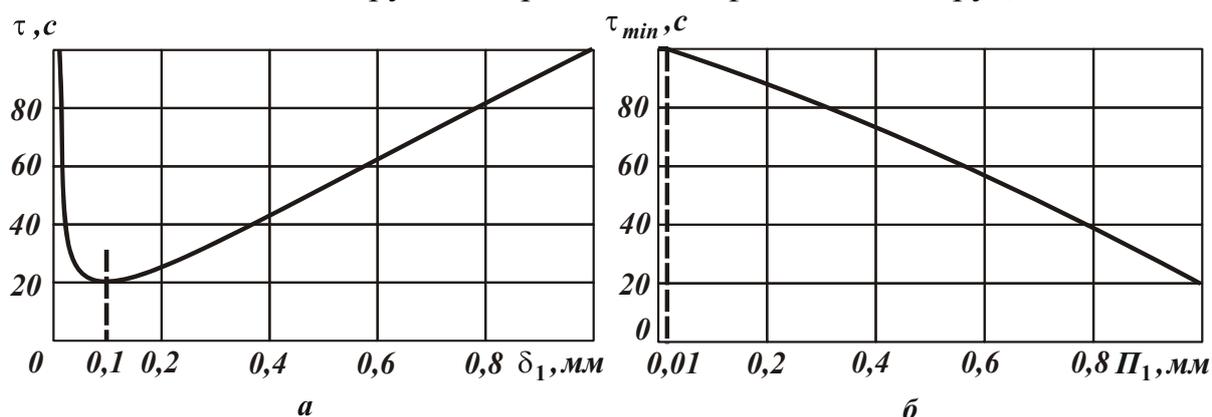


Рис. 2. Зависимость τ от δ_1 для $B=1$ с, $\Pi_1=\Pi=1$ мм, $\delta_2=0,01$ мм (а) и зависимость τ_{min} от Π_1 для $B=1$ с, $\Pi=1$ мм, $\delta_2=0,01$ мм (б).

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

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

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. 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 минимум (рис. 3), который достигается при условии:

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

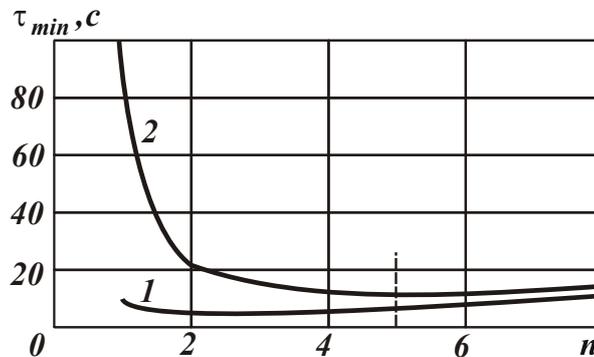


Рис. 3. Зависимость τ_{min} от n для разных значений $\varepsilon_{сум}$:

1 – $\varepsilon_{сум} = 10$; 2 – $\varepsilon_{сум} = 100$ ($B = 1с$).

Как видно, экстремальное (оптимальное) число переходов n определяется лишь суммарным уточнением $\varepsilon_{сум}$, 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:

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

Очевидно, уменьшить $(\tau_{min})_{min}$ можно за счет уменьшения параметра B . Как следует из табл. 1, с увеличением суммарного уточнения $\varepsilon_{сум}$ количество переходов n увеличивается, однако не существенно. Например, в диапазоне изменения $\varepsilon_{сум} = 2,72 \dots 54,7$ количество переходов n равно 1...4.

Таблица 1

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

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

Полученная зависимость $n = \ln \varepsilon_{сум}$ согласуется с известной 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 ($a=0,45-0,5$); $\varepsilon_{d0} = Td_{заг} / Td_{дем}$ – суммарное уточнение; $Td_{заг}$, $Td_{дем}$ – 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:

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

Таблица 2

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

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 21,2 с, а минимальное основное время обработки τ_{min} (при $m=e^0=1$) равно 5 с. 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.

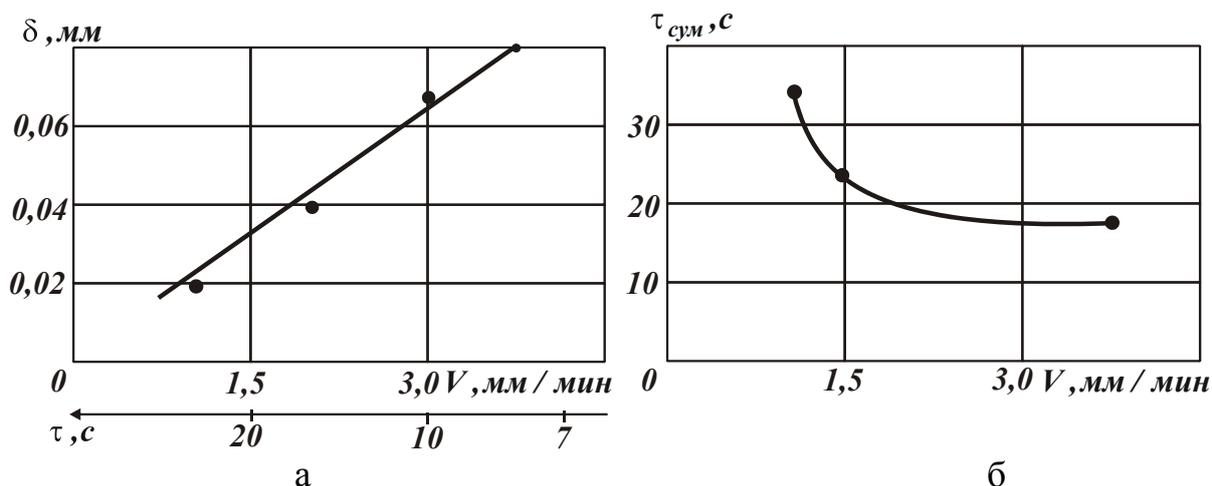


Рис. 4. Зависимости величин δ (а) и $\tau_{\text{сум}}$ (б) от скорости радиальной подачи V при круглом врезном шлифовании: круг – 1А1 400х80х203 24А 40 СМ1 К6; обр. мат. – сталь 45; $V_{\text{кр}}=35$ м/с; $V_{\text{дет}}=13,2$ м/мин.

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...1,28с, 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 черного шлифования и выхаживания (при заданной точности размера обработанной поверхности) уменьшается. Это связано с увеличением величины упругого перемещения в начале перехода выхаживания.

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 НТУ "ХПІ". – 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.

Поступила в редколлегию 17.07.2008