

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО ВАРИАНТА ОПЕРАЦИИ ШЛИФОВАНИЯ ПО КРИТЕРИЯМ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ

Шлифование является наиболее эффективным методом окончательной механической обработки, обеспечивающей высокие показатели точности и шероховатости [1–4]. Вместе с тем, достижение этих показателей характеризуется относительно высокой трудоемкостью обработки. Поэтому вопросы повышения производительности обработки на финишных операциях шлифования представляются весьма важными и актуальными. Цель работы – обоснование и выбор оптимального варианта операции шлифования по критериям производительности и точности обработки.

Рассмотрим закономерности формирования погрешностей обработки, обусловленных возникновением упругих перемещений в технологической системе y при шлифовании прямолинейного образца, движущегося по нормали к рабочей поверхности круга с постоянной скоростью V_0 , рис. 1. Баланс перемещений в технологической системе при этом описывается уравнением [5]:

$$V_0 \cdot \tau = \int_0^{\tau} V(\tau) \cdot d\tau + y, \quad (1)$$

где $V(\tau)$ – линейная скорость съема припуска, м/с; τ – время обработки, с; $y = \frac{P_y}{c} = B \cdot V(\tau)$ – величина упругого перемещения, м; $B = \frac{\sigma}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}$ – постоянная времени образования упругого перемещения в технологической системе, с; P_z, P_y – тангенциальная и радиальная составляющие силы резания при шлифовании, Н; c – приведенная жесткость технологической системы, Н/м; $K_{ш} = P_z / P_y$ – коэффициент шлифования; σ – условное напряжение резания при шлифовании, Н/м²; F – площадь поперечного сечения обрабатываемого образца, м²; $V_{кр}$ – скорость круга, м/с.

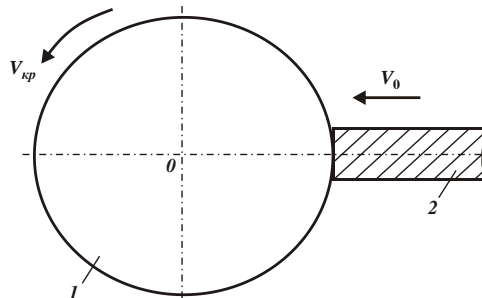


Рис. 1. Расчетная схема параметров шлифования: 1 – круг; 2 – обрабатываемый образец.

Продифференцируем все слагаемые уравнения (1) по времени τ :

$$B \cdot \frac{dV(\tau)}{d\tau} + V(\tau) = V_0. \quad (2)$$

В результате получено линейное дифференциальное уравнение первого порядка с правой частью. Решение уравнения (2) общеизвестно, с учетом начального условия $y(\tau=0) = y_0$ (где y_0 – начальный натяг в технологической системе), имеем

$$y = y_{уст} + (y_0 - y_{уст}) \cdot e^{-\frac{1}{B} \tau}, \quad (3)$$

где $y_{уст} = B \cdot V_0$ – величина упругого перемещения, возникающего в технологической системе в установившемся во времени процессе шлифования, м.

С учетом $\Pi = V_0 \cdot \tau$ (Π – текущее значение припуска) зависимость (3) выразится:

$$y = y_{уст} + (y_0 - y_{уст}) \cdot e^{-\frac{\Pi}{y_{уст}}}. \quad (4)$$

При условии $y_{уст} = 0$, т.е. при шлифовании с отключенной радиальной подачей (по схеме выхаживания), зависимость (4) упростится и примет вид:

$$y = y_0 \cdot e^{-\frac{\Pi}{y_{уст}}} = y_0 \cdot e^{-\frac{\tau}{B}}. \quad (5)$$

При условии $y_0 = 0$ (т.е. при врезании круга) зависимость (4) опишется:

$$y = y_{ycm} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\Pi}{y_{ycm}}} \right) = y_{ycm} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\tau}{B}} \right). \quad (6)$$

Сравнивая зависимости (5) и (6), видно, что при $y_0 = y_{ycm}$ они взаимно противоположны. За одно и то же время обработки τ_0 при врезании и выхаживании достигается одна и та же степень приближения величины y к асимптотам ($y = y_0$ и $y = 0$).

Произведем упрощенный расчет наименьшего основного времени обработки с учетом ограничения по точности размера обрабатываемой поверхности. Предположим, что с обрабатываемого образца (при его постоянном контакте с кругом) необходимо удалить припуск величиной Π за два перехода, осуществляемые с разными скоростями радиальной подачи V_1 и V_2 , и обеспечить заданную погрешность обработки y_2 . В этом случае величина упругого перемещения y_1 на первом переходе будет определяться зависимостью (6), а на втором переходе – зависимостью (4). Первоначально будем считать, что на втором переходе $y_{ycm} = 0$, т.е. $V_2 = 0$ и шлифование выполняется с отключенной радиальной подачей по схеме выхаживания. Тогда величина упругого перемещения y будет определяться упрощенной зависимостью (5). Исходя из этого условия, номинальная величина снимаемого припуска на первом переходе равна Π , а на втором переходе равна $y_0 = y_1$. Задача состоит в определении наименьшего основного времени обработки на двух переходах $\tau = \tau_1 + \tau_2$, где $\tau_1 = \Pi / V_1 = B \cdot \Pi / y_{ycm_1}$ – время обработки на первом переходе, с; V_1 – скорость радиальной подачи образца на первом переходе, м/с; $y_{ycm_1} = B \cdot V_1$.

Время обработки на 2 переходе τ_2 определяется из (5), рассматривая $y_0 = y_1$:

$$\frac{\tau_2}{B} = \ln \frac{y_1}{y_2}. \quad (7)$$

Как видно, для определения основного времени обработки τ необходимо знать величины y_{ycm} и y_1 . Принимая исходные данные $\Pi = 1$ мм и $y_2 = 0,186$ мм, рассмотрим методику расчета τ . В начале задается значение y_1 / y_{ycm_1} и устанавливается значение Π / y_{ycm_1} . Для заданной величины $\Pi = 1$ мм, определяются значения y_{ycm_1} , y_1 и соответственно $\tau_1 = B \cdot \Pi / y_{ycm_1}$. Далее, по зависимости (7) определяется τ_2 . В табл. 1 приведены рассчитанные таким образом значения указанных величин и основного времени обработки τ для различных значений y_1 / y_{ycm_1} . Как видно, с уменьшением y_1 / y_{ycm_1} и увеличением величин y_{ycm_1} и y_1 основное время обработки τ уменьшается, достигая наименьшего значения при $y_1 = \Pi = 1$ мм. В этом случае время обработки на первом переходе $\tau_1 \rightarrow 0$, т.е. фактически сьем припуска происходит на втором переходе. Следовательно, оптимальным вариантом операции шлифования является операция, на которой на первом переходе происходит ускоренное врезание круга в обрабатываемый материал на всю глубину снимаемого припуска Π , на втором переходе по схеме выхаживания (т.е. без радиальной подачи образца) происходит удаление всего припуска и формирование заданной точности размера обрабатываемой поверхности, определяемой величиной y_2 .

Таблица 1

Расчетные значения параметров

y_1 / y_{ycm_1}	Π / y_{ycm_1}	y_{ycm_1} , мм	y_1 , мм	τ_1 / B	τ_2 / B	τ / B
0,95	3,0	0,333	0,316	3,0	0,53	3,53
0,632	1,0	1,0	0,632	1,0	1,22	2,22
0,393	0,5	2,0	0,786	0,5	1,44	1,94
0,095	0,1	10,0	0,95	0,1	1,63	1,73
0,01	0,01	100,0	1,0	0,01	1,68	1,69

Для сравнения рассмотрим упрощенный вариант расчета, используя вместо зависимости (6) упрощенную зависимость $y_1 = y_{ycm}$. В табл. 2 приведены расчетные значения параметров τ_1 / B , τ_2 / B и τ / B . Как следует из таблицы, с увеличением величины y_1 основное время обработки τ / B уменьшается, принимая наименьшее значение при $y_1 = \Pi = 1$ мм, т.е. как и в выше приведенном уточненном расчете. При этом величина τ_2 / B принимает одно и то же значение, а величина τ / B – большее значение. Это указывает на возможность уменьшения $\tau_1 \rightarrow 0$ за счет увеличения скорости радиальной подачи образца на первом переходе V_1 , т.к. первый переход выполняет, как бы подготовительную функцию – обеспечивает создание начального натяга в технологической системе $y_1 = \Pi = 1$ мм и на нем не происходит удаление припуска. В результате может быть

достигнуто значение $\tau = \tau_2$, как и в выше приведенном уточненном расчете. В данном случае τ описывается зависимостью:

$$\tau = B \cdot \left(\frac{\Pi}{y_1} + \ln \frac{y_1}{y_2} \right). \quad (8)$$

Как видно, функция τ изменяется по экстремальной зависимости с изменением y_1 . Поэтому определим экстремум функции τ из условия $\tau'_{y_1} = 0$. После преобразований, получим $y_1 = \Pi$. Вторая производная функции τ от величины y_1 в точке экстремума положительна. Следовательно, имеет место минимум функции τ :

$$\tau_{min} = B \cdot \left(1 + \ln \frac{\Pi}{y_2} \right). \quad (9)$$

Таблица 2

Расчетные значения параметров τ_1/B , τ_2/B и τ/B

$y_{усм1}$, мм	y_1 , мм	τ_1/B	τ_2/B	τ/B
0,333	0,333	3,0	0,58	3,58
1,0	1,0	1,0	1,68	2,68

Этим показано, что наименьшее значение τ достигается при условии $y_1 = \Pi$, т.е. при создании в технологической системе на первом переходе натяга y_1 , равного величине снимаемого припуска Π . Данное решение согласуется с результатами численных расчетов, приведенных в табл. 2.

Произведем уточненный расчет наименьшего основного времени обработки с учетом ограничения по точности размера обрабатываемой поверхности. Получим общее аналитическое решение для определения основного времени обработки τ на операции шлифования в два перехода (рис. 2). Для этого τ представим в виде:

$$\tau = B \cdot \left(\frac{\Pi_1}{y_{усм1}} + \frac{\Pi_2}{y_{усм2}} \right). \quad (10)$$

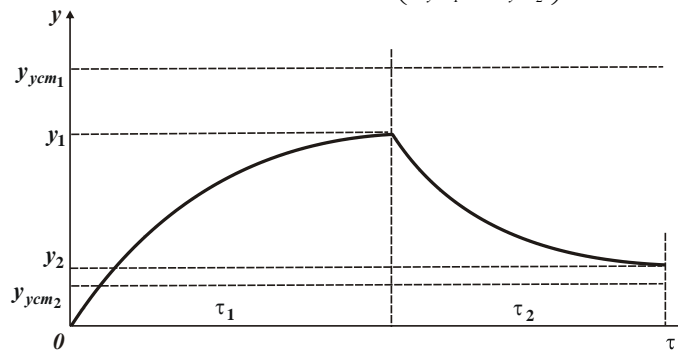


Рис. 2. Зависимость величины y от τ на операции шлифования в два перехода.

Далее, разрешим зависимость (10) относительно параметра $y_{усм1}$:

$$y_{усм1} = \frac{\Pi_1}{\left(\frac{\tau}{B} + \frac{\Pi_2}{y_{усм2}} \right)}. \quad (11)$$

Подставим полученную зависимость (11) в (6), рассматривая в ней $y = y_1$:

$$y_1 = \frac{\Pi_1}{\left(\frac{\tau}{B} + \frac{\Pi_2}{y_{усм2}} \right)} \cdot \left[1 - e^{-\left(\frac{\tau}{B} + \frac{\Pi_2}{y_{усм2}} \right)} \right]. \quad (12)$$

Затем подставим зависимость (12) в (4), рассматривая в ней $y = y_2$, $y_0 = y_1$:

$$y_2 = y_{усм2} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\Pi_2}{y_{усм2}}} \right) + \frac{\Pi_1}{\left(\frac{\tau}{B} + \frac{\Pi_2}{y_{усм2}} \right)} \cdot \left[1 - e^{-\left(\frac{\tau}{B} + \frac{\Pi_2}{y_{усм2}} \right)} \right] \cdot e^{-\frac{\Pi_2}{y_{усм2}}}. \quad (13)$$

Задавая значения y_2 , Π , Π_1 и соответственно $\Pi_2 = \Pi - \Pi_1$, на основе уравнения (13) можно численным расчетом определить основное время обработки τ/B в зависимости от параметра $y_{усм_2}$. Используя уравнение (13), рассмотрим предыдущий случай: $\Pi_1 = \Pi$; $\Pi_2 = 0$; $y_{усм_2} = 0$; $\frac{\Pi_2}{y_{усм_2}} = \frac{\tau_2}{B}$. Тогда уравнение (13) упрощается и примет вид:

$$y_2 = \frac{\Pi}{\left(\frac{\tau}{B} - \frac{\tau_2}{B}\right)} \cdot \left[1 - e^{-\left(\frac{\tau}{B} - \frac{\tau_2}{B}\right)}\right] \cdot e^{-\frac{\tau_2}{B}}. \quad (14)$$

Для исходных данных: $y_2 = 0,186$ мм и $\Pi = 1$ мм в табл. 3 приведены рассчитанные на основе уравнения (14) значения τ/B . Как видно, полученные данные совпадают с аналогичными данными, приведенными в табл. 1. Следовательно, применение уравнения (14) позволяет упростить методику расчета времени обработки τ .

Определим теперь основное время обработки τ при шлифовании в два перехода с $V_2 > 0$. Для этого зададим значения Π , Π_1 , $\Pi_2 = \Pi - \Pi_1$, $\Pi_1/y_{усм_1}$ и соответственно, $y_{усм_1}$ и определим значение y_1 . Затем, из уравнения (4), рассматривая в нем $y = y_2$, $y_0 = y_1$, определим $y_{усм_2}$ для известных значений y_2 и y_1 . Принимая $y_2 = 0,186$ мм и $\Pi = 1$ мм, в табл. 4 приведены результаты расчетов параметров $y_{усм_1}$, y_1 , $y_{усм_2}$ и τ/B (определяемого зависимостью (10)).

Таблица 3

τ_2/B	0,53	1,22	1,44	1,63	1,68
τ/B	3,53	2,22	1,94	1,73	1,69

Таблица 4

Π_1	$\Pi_1 = 0,25$ мм; $\Pi_2 = 0,75$ мм				$\Pi_1 = \Pi_2 = 0,5$ мм			
	$y_{усм_1}$, мм	y_1 , мм	$y_{усм_2}$, мм	$\frac{\tau}{B}$	$y_{усм_1}$, мм	y_1 , мм	$y_{усм_2}$, мм	$\frac{\tau}{B}$
1,0	—	—	—	—	0,5	0,316	0,178	3,808
0,5	0,5	0,196	0,1858	4,536	1,0	0,393	0,174	3,373
0,1	2,5	0,237	0,185	4,154	5,0	0,475	0,17	3,041
0	∞	0,25	0,1845	4,065	∞	0,5	0,169	2,958

Π_1	$\Pi_1 = 0,75$ мм; $\Pi_2 = 0,25$ мм				$\Pi_1 = 0,95$ мм; $\Pi_2 = 0,05$ мм			
	$y_{усм_1}$, мм	y_1 , мм	$y_{усм_2}$, мм	$\frac{\tau}{B}$	$y_{усм_1}$, мм	y_1 , мм	$y_{усм_2}$, мм	$\frac{\tau}{B}$
1,0	0,75	0,474	0,134	2,865	0,95	0,6	0,0376	2,329
0,5	1,5	0,589	0,1245	2,508	1,9	0,746	0,0327	2,029
0,1	7,5	0,712	0,116	2,255	9,5	0,902	0,029	1,818
0	∞	0,75	0,1145	2,183	∞	0,95	0,0284	1,76

Как видно, с увеличением Π_1 время τ/B уменьшается, достигая наименьшего значения при условии $\Pi_1 = \Pi$, т.е. когда съем припуска и формирование точности происходит на втором переходе, осуществляемом по схеме выхаживания. Первый переход служит лишь для создания в системе натяга величиной $y_1 = \Pi$.

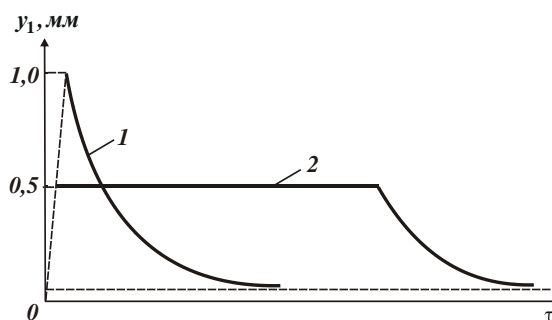


Рис. 3. Зависимость y от τ : 1 - $y_1 = \Pi_1 = \Pi = 1$ мм; 2 - $y_1 = \Pi_1 = 0,5$ мм.

Следует отметить, что создание натяга, равного величине снимаемого припуска, не всегда реализуемо на станке. Поэтому припуск необходимо разбивать по переходам, обеспечивая предельно возможные значения натяга в технологической системе y_1 . Например, при $y_1 = \Pi_1 = \Pi = 1$ мм (табл. 1) наименьшее основное время обработки $\tau/B = 1,69$. При $y_1 = \Pi_1 = 0,5$ мм (табл. 4) наименьшее основное время обработки $\tau/B = 2,958$. Следовательно, с уменьшением натяга y_1 (создаваемого за счет ускоренного врезания круга в обрабатываемый материал) основное время обработки τ/B увеличивается, рис. 3. Однако это связано лишь с невозможностью создания в технологической системе значительного натяга y_1 , равного величине снимаемого припуска.

Произведем выбор оптимальной схемы съема припуска с учетом ограничения по точности размера обрабатываемой поверхности. Определим условия уменьшения основного времени обработки в случае ограничения по величине начального натяга в технологической системе. Для этого рассмотрим операцию шлифования, выполняемую за несколько переходов, включающих поочередно переходы врезания круга в обрабатываемый материал с ускоренной радиальной подачей (с целью создания в технологической системе начального натяга), и переходы выхаживания (т.е. шлифование с отключенной радиальной подачей). Предположим, что на первом переходе натяг в технологической системе равен $y_0 = \Pi/n$, а на всех последующих $(n-1)$ переходах – $y_0 = \Pi/n + y$. Исходя из (5), основное время обработки на первом переходе определится

$$\frac{\tau_1}{B} = \ln \frac{\Pi}{n \cdot y} = \ln \frac{\varepsilon_{\text{сум}}}{n}, \quad (15)$$

где $\varepsilon_{\text{сум}} = \Pi/y$ – суммарное уточнение.

Основное время обработки на всех последующих $(n-1)$ переходах определится

$$\frac{\tau_2}{B} = \frac{\tau_3}{B} = \dots = \frac{\tau_n}{B} = \ln \frac{\Pi/n + y}{y} = \ln \left(\frac{\varepsilon_{\text{сум}}}{n} + 1 \right). \quad (16)$$

Тогда суммарное основное время обработки τ равно

$$\frac{\tau}{B} = \frac{\tau_1}{B} + \dots + \frac{\tau_n}{B} = \ln \frac{\varepsilon_{\text{сум}}}{n} + (n-1) \cdot \ln \left(\frac{\varepsilon_{\text{сум}}}{n} + 1 \right). \quad (17)$$

Таблица 5

Расчетные значения τ/B для $\varepsilon_{\text{сум}} = 5,376$

n	1	2	3	4	5
τ/B	1,68	2,3	2,65	2,85	2,99

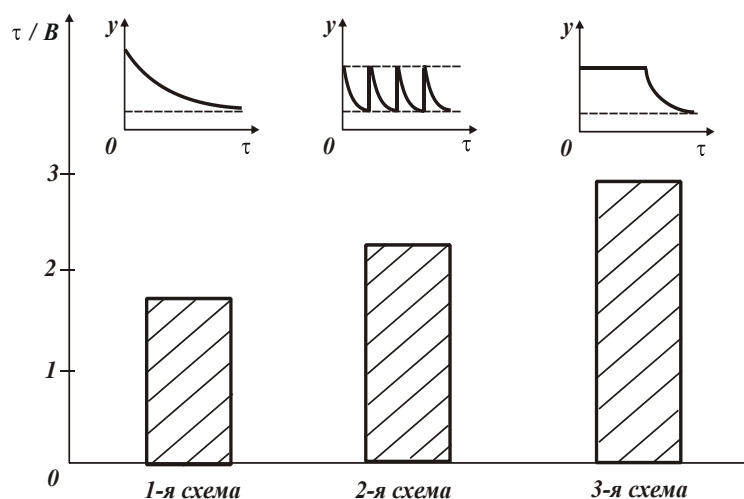


Рис. 4. Диаграмма изменения величины τ/B для трех схем шлифования.

В табл. 5 приведены рассчитанные по зависимости (17) значения τ/B для $\varepsilon_{\text{сум}} = 5,376$. Как видно, с увеличением количества переходов n основное время обработки τ увеличивается, т.е. эффективно съем припуска производить за один переход ($\tau/B = 1,69$). Вместе с тем, при осуществлении данной схемы шлифования основное время обработки τ всегда меньше, чем при шлифовании в два перехода, включающем врезание и выхаживание при условии $\Pi_1 = 0,5\Pi$. Например, как следует из табл. 4 в этом случае $\tau/B = 2,958$, тогда как исходя из табл. 5, при $n=2$ (т.е. при $\Pi_1 = 0,5\Pi$) отношение $\tau/B = 2,3$. Следовательно, в случае

шлифования, когда невозможно в технологической системе создать натяг, равный величине снимаемого припуска, целесообразно съём припуска осуществлять с применением пульсирующей подачи. Данная схема позволяет повысить производительность обработки при обеспечении заданной точности размера обрабатываемой поверхности. Здесь эффект достигается, во-первых, за счет ускоренного врезания круга в обрабатываемый материал, благодаря чему фактически исключаются потери времени на периодическое создание натягов в технологической системе. Во-вторых, за счет реализации начального участка зависимости $y - \tau$ на переходе выхаживания, что способствует повышению производительности и точности обработки.

Как следует из рис. 4, наименьшее основное время обработки достигается при шлифовании, включающем переход ускоренного врезания круга в обрабатываемую деталь на величину снимаемого припуска и переход выхаживания, т.е. по сути, при шлифовании по схеме выхаживания с начальным натягом в технологической системе, равным величине снимаемого припуска. Второй по эффективности является схема шлифования с пульсирующей подачей. При этом количество пульсаций должно быть минимальным, определяемым максимально возможным натягом, создаваемым в системе. Третья схема шлифования, включающая переходы врезания (чернового шлифования) и выхаживания, является наименее эффективной, т.к. характеризуется наибольшим основным временем обработки τ .

ВЫВОДЫ

Аналитически описаны закономерности формирования погрешностей обработки, обусловленных возникновением упругих перемещений в технологической системе. Решена задача оптимизации структуры и параметров операции шлифования по наименьшему основному времени обработки с учетом ограничения по точности размера обрабатываемой поверхности. Доказано, что наименьшее основное время обработки достигается при съеме всего припуска за один переход, включающий лишь выхаживание, при условии создания в технологической системе предварительного натяга.

Перечень ссылок

1. Управление процессом шлифования / А.В. Якимов, А.Н. Паршаков, В.И. Сверщев, В.П. Ларшин. – К.: Техніка, 1983. – 182 с.
2. Тверской М.М. Автоматическое управление режимами обработки деталей на станках / М.М. Тверской. – М.: Машиностроение, 1982. – 208 с.
3. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 1. "Механика резания материалов" – Одесса: ОНПУ, 2002. – 580 с.
4. Рябенков И.А. Повышение эффективности финишной обработки деталей гидроаппаратуры на основе выбора рациональной структуры и параметров операций: автореф. дис. на соискание научн. степени канд. техн. наук: спец. 05.02.08 "Технология машиностроения" / И.А. Рябенков. – Одесса, 2009. – 21 с.
5. Новиков Ф.В., Бережной Р.А. Повышение точности и производительности механической обработки // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. – 2009. – Вип. 81. – С. 29-38.