

ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ И ПАРАМЕТРОВ ОПЕРАЦИЙ ШЛИФОВАНИЯ ПЛОСКИХ И ВНУТРЕННИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ

Новиков Ф.В., докт. техн. наук, Бережной Р.А.

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

В работе произведен научно обоснованный выбор оптимальной по структуре и параметрам операции шлифования на основе критерия наименьшего основного времени обработки с учетом ограничения по точности размера обрабатываемой поверхности

Введение и постановка задачи. При шлифовании плоских и внутренних цилиндрических поверхностей деталей машин постоянно возникает проблема обеспечения высоких показателей точности обработки. Решению данной проблемы посвящены многочисленные публикации в научно-технической литературе [1, 2], в которых обоснованы наиболее эффективные схемы шлифования, составляющие основу структуры операции шлифования, а также определены оптимальные параметры режима резания и другие условия обработки. Вместе с тем, в теоретическом отношении данная проблема в полном объеме не решена и требует дальнейших исследований. Поэтому целью работы является выбор оптимальной по структуре и параметрам операции шлифования на основе критерия наименьшего основного времени обработки с учетом ограничения по точности размера обрабатываемой поверхности.

Материалы и результаты исследований. Для достижения поставленной цели воспользуемся теоретическим подходом к определению упругих перемещений, возникающих в технологической системе при шлифовании [3–5]. Первоначально установим общие закономерности съема припуска при плоском шлифовании по жесткой схеме (рис. 1) на основе баланса перемещений в технологической системе, описываемого уравнением:

$$t \cdot n = \int_0^n t_{\phi} \cdot dn + y, \quad (1)$$

где t, t_{ϕ} – соответственно номинальная и фактическая глубины шлифования, м;
 n – количество проходов круга; y – величина упругого перемещения, м;

$$y = \frac{P_y}{c} = \frac{P_z}{c \cdot K_{\text{ш}}} = \frac{\sigma \cdot Q_{\phi}}{c \cdot K_{\text{ш}} \cdot V_{\text{кр}}} = \frac{\sigma \cdot H \cdot V_{\text{дет}} \cdot t_{\phi}}{c \cdot K_{\text{ш}} \cdot V_{\text{кр}}} = B_1 \cdot t_{\phi}, \quad (2)$$

$K_{\text{ш}} = P_z / P_y$; P_y, P_z – радиальная и тангенциальная составляющие силы резания, Н; $P_z = \sigma \cdot Q_{\phi}$; σ – условное напряжение резания, Н/м²; $Q_{\phi} = H \cdot V_{\text{дет}} \cdot t_{\phi}$ –

фактическая производительность обработки, м³/с; H – ширина шлифования, м;
 $V_{дет}$ – скорость детали, м/с; $B_1 = \frac{\sigma \cdot H \cdot V_{дет}}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}$ – безразмерный параметр.

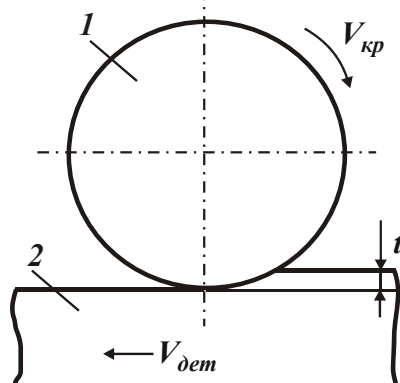


Рис. 1. Расчетная схема плоского шлифования: 1 – круг; 2 – деталь.

Из зависимости (2) вытекает: $B_1 = \frac{y}{t_\phi} = \frac{t - t_\phi}{t_\phi} = \frac{t}{t_\phi} - 1$. По физической сути

безразмерный параметр B_1 определяет степень расхождения фактической и номинальной глубин шлифования. Как следует из табл. 1, параметр B_1 при $t \gg t_\phi$ может изменяться в широких пределах.

Таблица 1

Расчетные значения параметра B_1

t/t_ϕ	1	1,5	2	3	5	10
B_1	0	0,5	1	2	4	9

Подставляя зависимость (2) в уравнение (1), получим

$$t \cdot n = \int_0^n t_\phi \cdot dn + \frac{\sigma \cdot H \cdot V_{дет} \cdot t_\phi}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}. \quad (3)$$

Дифференцируя полученное уравнение (3) по переменной n , приходим к дифференциальному уравнению:

$$B_1 \cdot \frac{dt_\phi}{dn} + t_\phi = t. \quad (4)$$

Решение дифференциального уравнения:

$$t_\phi = \left(\int dn \cdot \frac{t}{B_1} \cdot e^{\int \frac{dn}{B_1}} + C_1 \right) = t + C_1 \cdot e^{-\frac{n}{B_1}}, \quad (5)$$

где C_1 – постоянная интегрирования, определяется из начального условия.

Величина y с учетом зависимости (2) определяется

$$y = B_1 \cdot t + C_1 \cdot B_1 \cdot e^{-\frac{n}{B_1}}. \quad (6)$$

Подчиняя зависимость (6) начальному условию $y(n=0) = y_0$, где y_0 – начальный натяг в технологической системе, получим

$$C_1 = \frac{y_0 - B_1 \cdot t}{B_1}. \quad (7)$$

Соответственно

$$t_\phi = t + \left(\frac{y_0}{B_1} - t \right) \cdot e^{-\frac{n}{B_1}}, \quad (8)$$

$$y = B_1 \cdot t + (y_0 - B_1 \cdot t) \cdot e^{-\frac{n}{B_1}} = y_{ycm} + (y_0 - y_{ycm}) \cdot e^{-\frac{n}{B_1}}, \quad (9)$$

где $y_{ycm} = B_1 \cdot t$ – величина упругого перемещения, возникающего в технологической системе в установившемся во времени процессе шлифования, м.

При условии $y_0=0$ зависимости (8) и (9) упрощаются и принимают вид

$$t_\phi = t \cdot \left(1 - e^{-\frac{n}{B_1}} \right), \quad (10)$$

$$y = y_{ycm} \cdot \left(1 - e^{-\frac{n}{B_1}} \right). \quad (11)$$

На рис. 2 приведены расчетные значения параметров t_ϕ и y . Как видно, с увеличением количества проходов круга n значения параметра t_ϕ асимптотически приближаются к номинальной глубине шлифования $t=1$ мм. При этом значения t_ϕ тем больше, чем меньше безразмерный параметр B_1 . Величина y изменяется аналогично t_ϕ , увеличиваясь с увеличением B_1 .

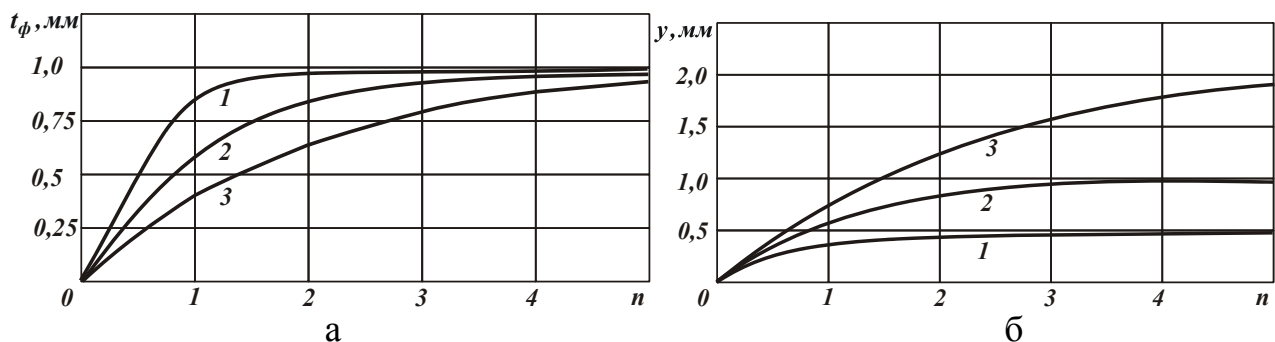


Рис. 2. Зависимости t_ϕ (а) и y (б) от n : 1 – $B_1=0,5$; 2 – $B_1=1$; 3 – $B_1=2$.

При выхаживании, т.е. при шлифовании с отключенной радиальной подачей, величина $y_{ycm}=0$ и параметры t_ϕ и y описываются зависимостями:

$$t_\phi = \frac{y_0}{B_1} \cdot e^{-\frac{n}{B_1}}, \quad (12)$$

$$y = y_0 \cdot e^{-\frac{n}{B_1}} \quad (13)$$

Параметр t_ϕ , характеризующий фактический съём обрабатываемого материала, с увеличением количества проходов круга n уменьшается по экспоненциальной зависимости, рис. 3,а. Фактическая глубина шлифования на каждом проходе круга равна разности значений $\Delta t_\phi = t_\phi(n-1) - t_\phi(n)$, рис. 3,б. Например, для $y_0=1$ мм; $B_1=0,5$; $n=1$, имеем: $\Delta t_\phi = 1$ мм $- 0,135$ мм $= 0,865$ мм. Величина y , описываемая зависимостью (13), с увеличением количества проходов круга n уменьшается по закону изменения параметра t_ϕ (рис. 2,б), что способствует повышению точности размера обрабатываемой поверхности.

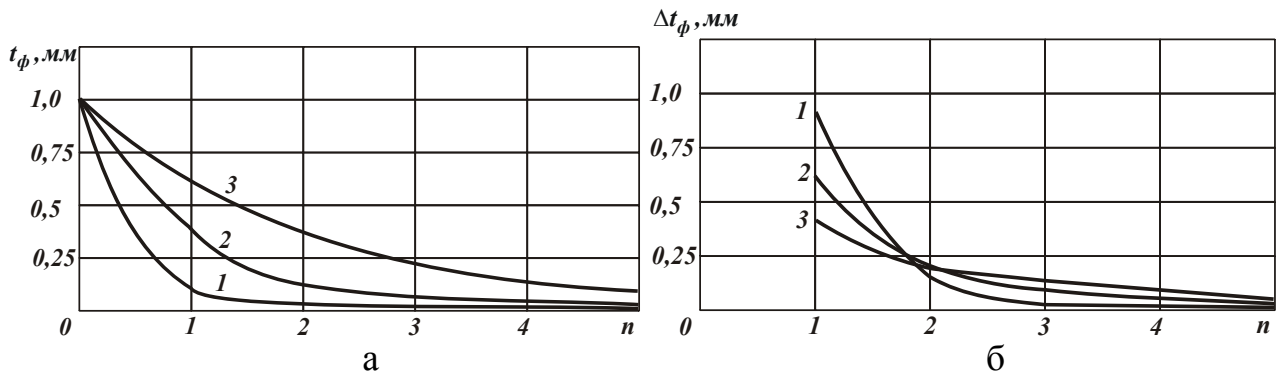


Рис. 3. Зависимости параметров t_ϕ (а) и Δt_ϕ (б) от количества проходов круга n при выхаживании: 1 – $B_1=0,5$; 2 – $B_1=1$; 3 – $B_1=2$.

Определим наименьшее основное время обработки $\tau = \tau_0 \cdot n$ (где $\tau_0 = L / V_{\text{дем}}$ – время продольного хода круга, с) при плоском шлифовании на переходе выхаживания с учетом ограничения по точности размера обрабатываемой поверхности. Количество проходов круга n определим из зависимости (13), рассматривая в ней величину y в качестве заданной погрешности размера обработки:

$$n = B_1 \cdot \ln \frac{y_0}{y} \quad (14)$$

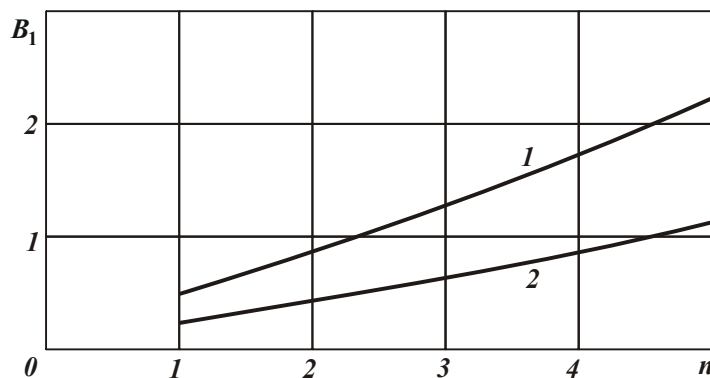


Рис. 4. Зависимость B_1 от n : 1 – $\varepsilon_{\text{сум}} = y_0 / y = 10$; 2 – $\varepsilon_{\text{сум}} = y_0 / y = 100$.

На рис. 4 графически показан характер изменения безразмерного параметра B_1 от n для различных значений суммарного уточнения $\varepsilon_{\text{сум}} = y_0 / y$ (с учетом $\ln 100 = 4,6$ и $\ln 10 = 2,3$). Очевидно, чем больше $\varepsilon_{\text{сум}} = y_0 / y$, тем меньше B_1 . Основное время обработки τ с учетом зависимости (14) и параметра B_1 определится

$$\tau = \frac{\sigma \cdot H \cdot L}{c \cdot K_{\text{ш}} \cdot V_{\text{кр}}} \cdot \ln \frac{y_0}{y}. \quad (15)$$

Как видно, уменьшить τ можно повышением режущей способности круга за счет уменьшения отношения $\sigma / K_{\text{ш}}$, увеличением жесткости технологической системы c , $V_{\text{кр}}$ и уменьшением H и $\varepsilon_{\text{сум}} = y_0 / y$. Основное время обработки τ не зависит от скорости детали $V_{\text{дет}}$ и соответственно n . Исходя из зависимости (12), это свидетельствует о том, что τ также не зависит и от $t_{\text{ф}}$.

С учетом сказанного скорость детали $V_{\text{дет}}$ определяется из (14):

$$V_{\text{дет}} = \frac{c \cdot K_{\text{ш}} \cdot V_{\text{кр}}}{\sigma \cdot H} \cdot \frac{n}{\ln \frac{y_0}{y}}. \quad (16)$$

При $n=1$ величина начального натяга в технологической системе y_0 равна номинальной глубине шлифования t . Тогда зависимость (16) выразится

$$V_{\text{дет}} = \frac{c \cdot K_{\text{ш}} \cdot V_{\text{кр}}}{\sigma \cdot H} \cdot \frac{1}{\ln \frac{t}{y}}. \quad (17)$$

Как видно, $V_{\text{дет}}$ тем больше, чем больше c , $K_{\text{ш}} / \sigma$, $V_{\text{кр}}$ и меньше H и $\varepsilon_{\text{сум}} = y_0 / y$. Выполнение условия $y_0 = t = \Pi$ предполагает реализацию схемы глубинного шлифования с относительно небольшой скоростью детали $V_{\text{дет}}$, т.к. с увеличением глубины шлифования t , согласно зависимости (17), скорость детали уменьшается. Следовательно, обеспечить заданную погрешность обработки y с одинаковой производительностью обработки можно как в условиях многопроходного ($n > 1$), так и глубинного ($n = 1$) шлифования. Однако при этом будут различны значения шероховатости поверхности, силы и температуры резания, себестоимость обработки. Поэтому выбор оптимального количества проходов круга n и соответственно оптимальной скорости детали $V_{\text{дет}}$ в данном случае необходимо устанавливать из условия обеспечения требуемого качества обработки (ограничения по температуре шлифования) или минимально возможной себестоимости обработки и т.д.

Доказанная эффективность съема припуска за один проход круга указывает на то, что вместо шлифования можно использовать однопроходное резание лезвийным инструментом, обеспечивая при этом заданную точность обработки. Кроме того, как известно, при резании лезвийным инструментом отношение $\sigma / K_{\text{ш}}$ (рассматривая $K_{\text{ш}} = P_z / P_y$ как коэффициент резания) меньше, чем при шлифовании, а это позволяет уменьшить основное время обработки τ и соответственно увеличить

скорость детали $V_{дет}$. Собственно этим можно объяснить то, что на практике при механической обработке основную часть припуска рекомендуется удалять с использованием лезвийных инструментов (на операциях предварительной обработки) и лишь весьма малую часть – с использованием абразивных инструментов (на операциях окончательной обработки) с целью устранения дефектного слоя и обеспечения высокого качества и шероховатости обрабатываемых поверхностей.

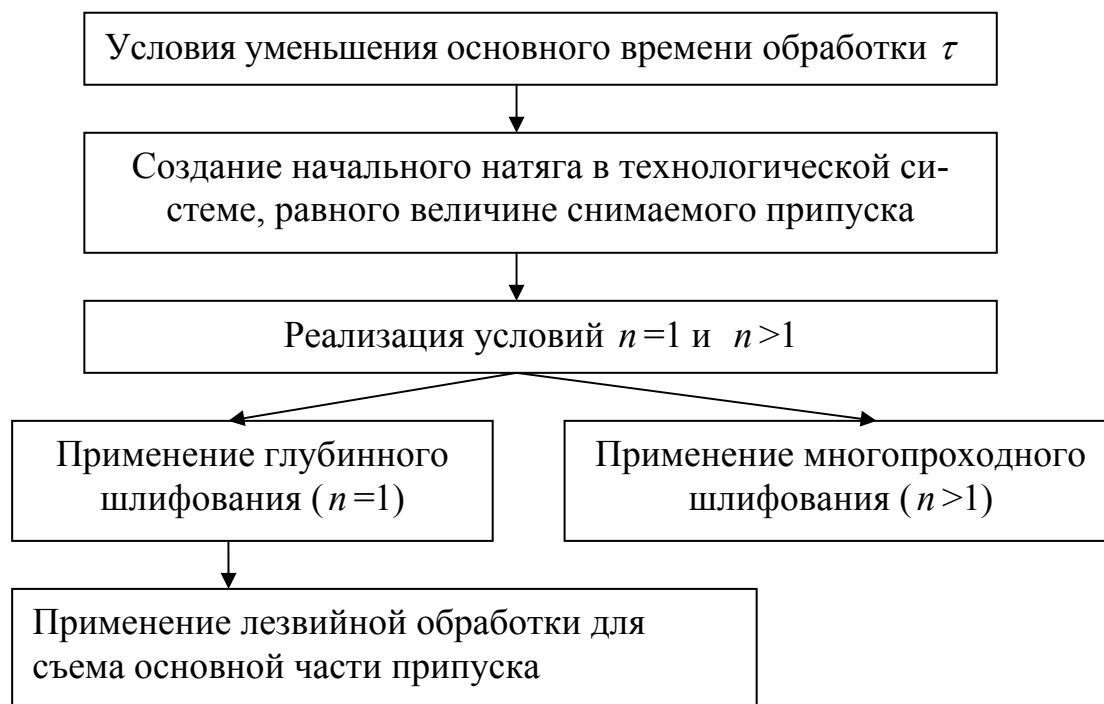


Рис. 5. Структурная схема условий уменьшения основного времени τ .

Таким образом, на основе полученного теоретического решения удалось, пожалуй, впервые определить оптимальную структуру съема припуска с точки зрения обеспечения максимально возможной производительности и заданной точности обработки с использованием абразивных и лезвийных инструментов. На рис. 5 представлена структурная схема условий уменьшения основного времени обработки τ с учетом ограничения по точности размера обработанной поверхности.

Определим наименьшее основное время обработки при плоском шлифовании по жесткой схеме. Полученное выше решение справедливо при условии создания в технологической системе начального натяга y_0 , равного величине снимаемого припуска l . При невозможности выполнения этого условия, необходимо создавать в системе меньшие натяги. Однако это может привести к снижению производительности обработки. В связи с этим определим наименьшее основное время обработки τ при плоском шлифовании по жесткой схеме, не требующем создания в технологической системе значительных натягов. Для этого первоначально сравним зависимости (11) и (13), описывающие величину упругого перемещения y при выхаживании и шлифовании по жесткой схеме при $n=1$ и $y_0 = t$. Представим зависимость (11) в виде:

$$y_{уст} \cdot e^{-\frac{1}{B_1}} = y_{уст} - y. \quad (18)$$

Разделим правую и левую части зависимости (18) на параметр B_1 :

$$t \cdot e^{-\frac{1}{B_1}} = t - t_{\phi}. \quad (19)$$

Поскольку $t - t_{\phi} = y$, то справедлива зависимость:

$$y = t \cdot e^{-\frac{1}{B_1}}. \quad (20)$$

В результате пришли к зависимости (13) при $n=1$ и $y_0 = t$. Это указывает на то, что по физической сути зависимости (11) и (13) описывают один и тот же процесс формирования величины упругого перемещения y . Следовательно, при плоском шлифовании нет необходимости создавать в технологической системе значительные натяги $y_0 = t$, достаточно шлифовальный круг после каждого продольного хода выводить из контакта с обрабатываемой деталью и съём припуска производить с заданной номинальной глубиной шлифования t по жесткой схеме.

Определим основное время обработки $\tau = L \cdot n / V_{дет}$ при плоском шлифовании по жесткой схеме. Разрешим зависимость (11) относительно n :

$$n = B_1 \cdot \ln \frac{1}{\left(1 - \frac{y}{y_{уст}}\right)}, \quad \text{тогда} \quad (21)$$

$$\tau = \frac{L}{V_{дет}} \cdot n = \frac{\sigma \cdot H \cdot L}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \cdot \ln \frac{1}{\left(1 - \frac{y}{y_{уст}}\right)}. \quad (22)$$

Величина $y_{уст}$ равна

$$y_{уст} = B_1 \cdot t = \frac{\sigma \cdot H \cdot V_{дет} \cdot t}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} = \frac{\sigma \cdot Q}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} = \frac{\sigma}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \cdot \frac{\mathcal{G}_{объем}}{\tau}, \quad (23)$$

где $Q = H \cdot V_{дет} \cdot t = \frac{\mathcal{G}_{объем}}{\tau}$ – номинальная производительность обработки, м³/с;

$\mathcal{G}_{объем} = H \cdot L \cdot \Pi$ – объем снятого материала, м³.

Как видно, величина $y_{уст}$ не зависит от скорости детали $V_{дет}$ и номинальной глубины шлифования t , а определяется производительностью обработки Q , которая в свою очередь равна отношению объема снятого материала $\mathcal{G}_{объем}$ и основного времени обработки τ . Из этого вытекает, что основное время обработки τ , определяемое уравнением (22), не зависит от скорости детали $V_{дет}$ и номинальной глубины шлифования t , а соответственно и от n . Схемы многопроходного и глубинного (однопроходного) шлифования в данном случае равносильны. Они обеспечивают съём заданного припуска Π с одной и той же производительностью обработки Q и погрешностью обработки y . В итоге пришли к решению,

описываемому зависимостью (15). Этим показано, что по производительности обработки (с учетом ограничения по точности размера обрабатываемой поверхности) плоское шлифование по жесткой схеме и выхаживание равносильны. Однако, при выхаживании требуется создание в технологической системе значительного натяга, что не всегда практически выполнимо. При плоском шлифовании по жесткой схеме (в связи с периодическим выходом круга из контакта с обрабатываемой деталью) нет необходимости в создании значительных натягов. Поэтому данная схема более эффективна, о чем свидетельствует ее широкое применение на практике при съеме относительно больших припусков.

Определим окончательно τ , для чего подставим зависимость (23) в (22):

$$\frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр} \cdot \tau}{\sigma \cdot H \cdot L} = \ln \frac{1}{\left(1 - \frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр} \cdot \tau}{\sigma \cdot H \cdot L} \cdot \frac{y}{\Pi}\right)} \quad \text{или} \quad \frac{\alpha}{\varepsilon_{сум}} = 1 - e^{-\alpha}, \quad (24)$$

где $\alpha = \frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр} \cdot \tau}{\sigma \cdot H \cdot L}$ – безразмерный параметр; $\varepsilon_{сум} = \frac{\Pi}{y}$ – суммарное уточнение.

В итоге получено уравнение, содержащее неизвестный параметр α , который зависит лишь от суммарного уточнения $\varepsilon_{сум}$. Как следует из рис. 6, с увеличением $\varepsilon_{сум} > 1$ безразмерный параметр α непрерывно увеличивается.

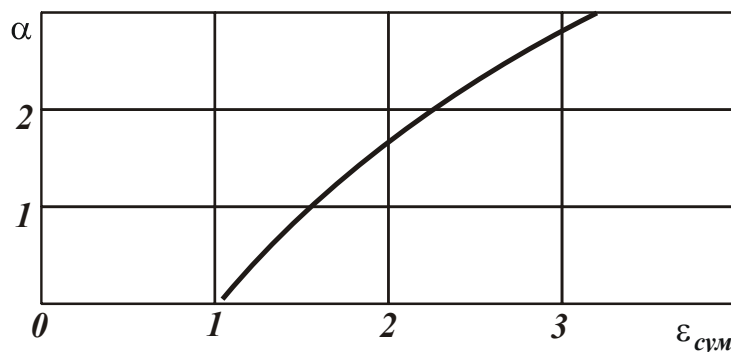


Рис. 6. Зависимость параметра α от суммарного уточнения $\varepsilon_{сум}$.

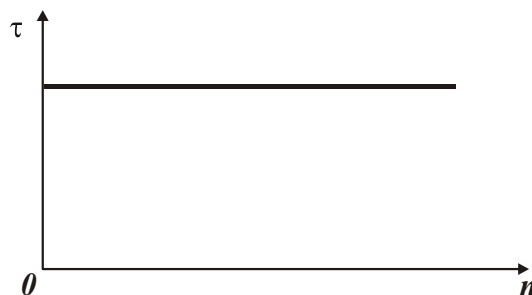


Рис. 7. Зависимость τ от n .

Зная параметр α , можно определить основное время обработки τ (рис. 7):

$$\tau = \frac{\sigma \cdot H \cdot L \cdot \alpha}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} = B \cdot \alpha, \quad (25)$$

где $B = \frac{\sigma \cdot H \cdot L}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}$.

Из зависимости (25) вытекает, что основное время обработки τ тем меньше, чем меньше параметр α и, согласно рис. 6, – меньше суммарное уточнение $\varepsilon_{\text{сум}}$. Таким образом показано, что τ определяется параметром B и величиной α , которая зависит от суммарного уточнения $\varepsilon_{\text{сум}}$. Скорость детали $V_{\text{дет}}$ и номинальная глубина шлифования t , а также n не влияют на τ , т.е. с одинаковой эффективностью съём припуска можно производить как по схеме многопроходного, так и по схеме глубинного однопроходного шлифования. Предпочтение следует отдавать той схеме, для которой отношение $\sigma / K_{\text{ш}}$ (определяющее режущую способность круга) меньше.

При неустановившемся во времени процессе плоского шлифования (рис. 2,а) с целью повышения производительности обработки целесообразно съём припуска производить при выполнении условия равенства номинальной и фактической глубин шлифования ($t = t_{\phi}$). Исходя из зависимости (9), это достигается за счет исключения второго слагаемого (заклученного в круглые скобки), т.е. выполнения условия $y_0 = y_{\text{уст}}$. Тогда зависимость (9) примет простой вид: $y = y_{\text{уст}}$. Это указывает на необходимость создания в технологической системе и постоянного поддержания в процессе шлифования установившегося натяга величиной $y_0 = y_{\text{уст}}$, что наиболее просто достигается путем применения упругой схемы шлифования с фиксированным радиальным усилием $P_0 = c \cdot y_0 = c \cdot y_{\text{уст}}$. В данном случае фактическая глубина шлифования будет всегда равна номинальной глубине шлифования, что позволит уменьшить основное время τ .

Чтобы проверить правильность данного утверждения, определим основное время обработки $\tau = L \cdot n / V_{\text{дет}}$ при плоском многопроходном шлифовании по жесткой схеме с обеспечением заданного значения величины упругого перемещения y на каждом проходе круга $n = \Pi / t$. Величину y определим по зависимости (11) при условии $n=1$ с учетом $y_{\text{уст}} = B_1 \cdot t$:

$$t = \frac{y}{B_1 \cdot \left(1 - e^{-\frac{1}{B_1}}\right)}, \quad \text{тогда} \quad (26)$$

$$\tau = \frac{\sigma \cdot H \cdot \Pi \cdot L}{c \cdot K_{\text{ш}} \cdot V_{\text{кр}}} \cdot \frac{\left(1 - e^{-\frac{1}{B_1}}\right)}{y}. \quad (27)$$

Как следует из зависимостей (26) и (27), с увеличением B_1 и соответственно $V_{\text{дет}}$ номинальная глубина шлифования t и τ уменьшаются (при заданном значении y). Следовательно, с точки зрения уменьшения τ обработку эффективно вести по схеме многопроходного шлифования с увеличенным количеством проходов круга. Как показано выше, для реализации данного решения необходимо в технологической системе создать и постоянно поддерживать натяг величиной $y_0 = y_{\text{уст}}$

(путем применения упругой схемы шлифования с фиксированным радиальным усилием $P_0 = c \cdot y_0 = c \cdot y_{ycm}$) с целью обеспечения условия равенства номинальной и фактической глубины шлифования ($t = t_\phi$). В противном случае эффект обработки достигаться не будет, т.к. согласно зависимости (11), величина y с увеличением n не остается постоянной, а непрерывно увеличивается, асимптотически приближаясь к значению y_{ycm} , рис. 2,б. В итоге приходим к тому, что наиболее оптимальной схемой шлифования, обеспечивающей наименьшее основное время обработки с учетом ограничения по точности размера обрабатываемой поверхности, является традиционно применяемое плоское многопроходное шлифование по упругой схеме с минимально возможной глубиной шлифования и максимально достижимой на станке скоростью детали V_{dem} .

К данному решению можно прийти другим путем, рассматривая зависимость (2) с учетом $t_\phi = t - y$. Тогда зависимость (2) примет вид

$$y = \frac{t}{\left(1 + \frac{1}{B_1}\right)}. \quad (28)$$

Как видно, с увеличением номинальной глубины шлифования t и параметра B_1 (соответственно V_{dem}) величина y увеличивается. Разрешая зависимость (28) относительно производительности обработки $Q = H \cdot V_{dem} \cdot t$, имеем

$$Q = y \cdot \left(\frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}{\sigma} + H \cdot V_{dem} \right). \quad (29)$$

Увеличить Q при заданном значении y можно увеличением параметров $c, V_{кр}, H, V_{dem}$ и отношения $K_{ш} / \sigma$. Следовательно, с точки зрения повышения производительности обработки Q эффективно использовать схему плоского многопроходного шлифования с установлением максимально достижимой на станке скорости детали V_{dem} (или продольной подачи). Номинальная глубина шлифования t при этом определяется зависимостью, вытекающей из зависимости (28):

$$t = \left(1 + \frac{1}{B_1}\right) \cdot y. \quad (30)$$

Очевидно, чем больше безразмерный параметр B_1 и соответственно скорость детали V_{dem} , тем меньше должна быть номинальная глубина шлифования t . Зависимость (29) можно представить в виде

$$Q = P_y \cdot \left(\frac{K_{ш} \cdot V_{кр}}{\sigma} + \frac{H \cdot V_{dem}}{c} \right), \quad (31)$$

где $P_y = c \cdot y$ – радиальная составляющая силы резания, Н.

Из зависимости (31) следует однозначная связь между параметрами Q и P_y : большему значению P_y соответствует большее значение Q . Поэтому для стабильного обеспечения с течением времени обработки заданных значений Q и

у процесс плоского шлифования эффективно осуществлять по упругой схеме с фиксированным радиальным усилием. В результате пришли к ранее установленному решению (27), что свидетельствует о достоверности выполненных расчетов.

Из зависимости (31) можно определить важнейший параметр процесса шлифования – удельную производительность обработки:

$$\frac{Q}{P_y} = \left(\frac{K_{ш} \cdot V_{кр}}{\sigma} + \frac{H \cdot V_{дет}}{c} \right). \quad (32)$$

Как видно, увеличить отношение Q/P_y и соответственно повысить эффективность шлифования можно увеличением отношения $K_{ш}/\sigma$, параметров $V_{кр}, H, V_{дет}$ и уменьшением жесткости технологической системы c .

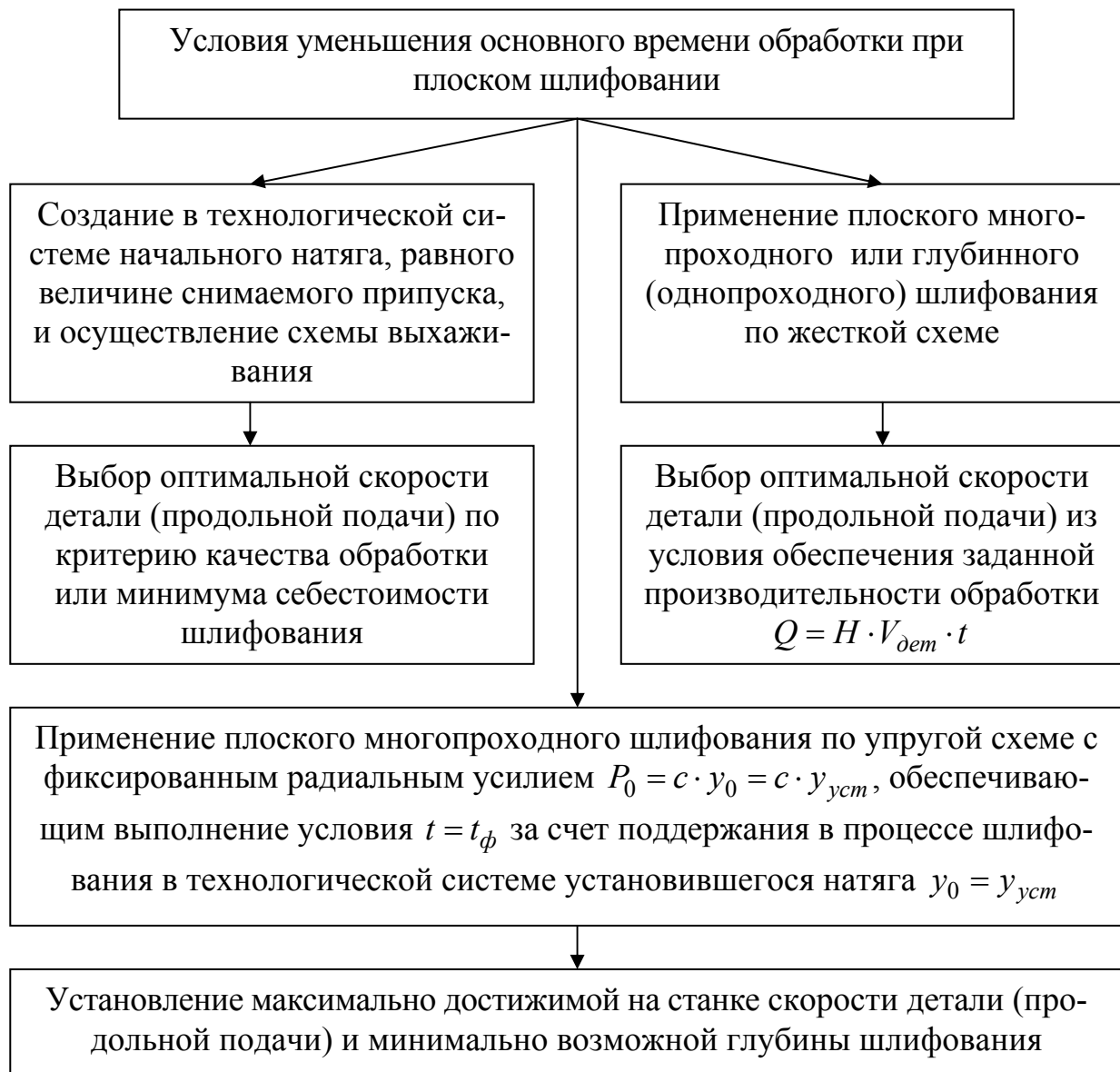


Рис. 8. Структурная схема условий уменьшения основного времени обработки.

На рис. 8 показана обобщенная структурная схема условий уменьшения основного времени обработки при плоском шлифовании с учетом ограничения по точности размера обрабатываемой поверхности. Как показано выше, уменьшить

основное время обработки τ можно тремя путями. Во-первых, за счет создания в технологической системе начального натяга, равного величине снимаемого припуска, и осуществления съема обрабатываемого материала по схеме выхаживания. В этом случае скорость детали не влияет на τ и ее выбор может быть произведен по другим технологическим критериям. Например, по критерию обеспечения качества обработки (исключения прижогов, микротрещин и других температурных дефектов, образующихся на обрабатываемых поверхностях), по критерию минимума себестоимости обработки и т.д. Во-вторых, за счет применения плоского многопроходного или глубинного (однопроходного) шлифования по жесткой схеме со скоростью детали (продольной подачей), определяемой из условия обеспечения заданной производительности обработки $Q = H \cdot V_{\text{дет}} \cdot t$. В-третьих, за счет применения плоского многопроходного шлифования по упругой схеме с фиксированным радиальным усилием $P_0 = c \cdot y_0 = c \cdot y_{\text{уст}}$, обеспечивающим выполнение условия $t = t_{\text{ф}}$ за счет поддержания в процессе шлифования в технологической системе установившегося натяга $y_0 = y_{\text{уст}}$. Причем, данная схема шлифования обеспечивает наименьшее основное время обработки с учетом ограничения по точности размера обрабатываемой поверхности. Для ее осуществления необходимо устанавливать максимально достижимую на станке скорость детали (продольную подачу) и минимально возможную глубину шлифования.

Необходимо отметить, что эффективность обработки с увеличенными продольными подачами подтверждена практическими данными. В частности, получила достаточно широкое применение схема круглого наружного многопроходного шлифования с продольной осцилляцией круга. Однако данный эффект обработки объясняется стремлением к форсированному съему припуска у деталей, длины которых превышают ширину круга. В действительности, как показано выше, эффект обработки связан с другими более сложными закономерностями, выявление которых позволило теоретически определить оптимальные условия обработки.

Выводы. 1. Аналитически описаны закономерности формирования упругих перемещений в технологической системе при плоском шлифовании, осуществляемом по жесткой и упругой схемам и схеме выхаживания. Показано, что при плоском многопроходном шлифовании величина упругого перемещения описывается экспоненциальными функциями. Причем, для жесткой схемы шлифования и схемы выхаживания – противоположными функциями, что существенно упрощает решение оптимизационных задач.

2. Доказано, что при плоском шлифовании по жесткой схеме и схеме выхаживания основное время обработки для заданной точности размера обрабатываемой поверхности не зависит от количества проходов и скорости детали. В этом случае схемы многопроходного и глубинного шлифования равносильны. Выбор оптимальной скорости детали может быть произведен по критерию качества обработки или минимума себестоимости шлифования, или заданной производительности обработки.

3. Теоретически установлено, что при плоском шлифовании по упругой схеме с фиксированным радиальным усилием с увеличением количества про-

ходов и соответственно скорости детали уменьшается основное время обработки для заданной точности размера обрабатываемой поверхности. Этим доказана возможность повышения точности и производительности за счет применения многопроходности обработки, т.е. применения плоского многопроходного шлифования по упругой схеме с минимально возможной глубиной шлифования и максимально достижимой на станке скоростью детали.

4. Произведен расчет оптимальных параметров режимов шлифования, обеспечивающих наибольшую производительность обработки для заданной точности размера обрабатываемой поверхности.

Список литературы

1. Лурье Г.Б. Шлифование металлов / Г.Б. Лурье. – М.: Машиностроение, 1969. – 197 с.
2. Тверской М.М. Автоматическое управление режимами обработки деталей на станках / М.М. Тверской. – М.: Машиностроение, 1982. – 208 с.
3. 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.
4. 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.
5. 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.