

ОБОСНОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ КРУГЛОГО ШЛИФОВАНИЯ ПО КРИТЕРИЯМ КАЧЕСТВА И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ОБРАБОТКИ

Новиков Ф.В., докт. техн. наук, **Андилахай В.А.**

*(Харьковский национальный экономический университет;
Приазовский государственный технический университет)*

Введение и постановка задачи. Нанесение на рабочие поверхности ответственных деталей износостойких наплавленных материалов стало важным фактором повышения их эксплуатационных свойств. В особой мере это относится к контактным поверхностям больших и малых конусов и чаш (диаметром соответственно 2000 и 5000 мм) засыпных аппаратов доменных печей, которые работают в условиях интенсивного износа и быстро выходят из строя. Нанесение на данные поверхности износостойких наплавленных материалов твердостью HRC 57 и более позволяет существенно повысить их надежность и ресурс работы. Однако при этом возникает проблема их высококачественной обработки на операциях круглого шлифования [1, 2]. В связи с высокой силовой и тепловой напряженностью процесса шлифования, обеспечение требуемых показателей точности и качества обрабатываемых поверхностей в условиях съема значительных неравномерных припусков (3 – 7 мм на сторону) сопряжено с чрезвычайно высокой трудоемкостью обработки. Применение прогрессивного метода алмазного электроэрозионного шлифования также положительных результатов не дает, т.к. алмазный круг интенсивно засаливается и теряет режущую способность, что фактически ведет к прекращению процесса съема припуска [3]. Все это требует определения новых технологических возможностей шлифования, обеспечивающих повышение точности, качества и производительности обработки. Целью работы является теоретическое обоснование и выбор оптимальной кинематической схемы круглого шлифования и параметров режимов шлифования.

Материалы и результаты исследований. В наших работах установлено, что при плоском шлифовании по схеме выхаживания величина упругого перемещения y описывается зависимостью

$$y = \frac{t}{\varepsilon^n}, \quad (1)$$

где t – глубина шлифования, м; $\varepsilon = 1 + \frac{1}{B_1}$ – уточнение; $B_1 = \frac{\sigma \cdot H \cdot V_{дет}}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}$ –

безразмерный параметр; σ – условное напряжение резания (энергоемкость обработки), Н/м²; $K_{ш} = P_z / P_y$; P_z, P_y – тангенциальная и радиальная составляющие силы резания, Н; c – приведенная жесткость технологической

системы, Н/м; H – ширина шлифования, м; $V_{дет}$, $V_{кр}$ – скорости детали и круга, м/с; n – количество проходов круга.

Как видно, увеличивая параметры ε и n , можно существенно уменьшить величину y , обеспечивая требуемую точность обработки. На основе зависимости (1) определяется основное время обработки

$$\tau = \frac{n \cdot L}{V_{дет}} = \frac{\sigma \cdot H \cdot L \cdot n}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \cdot \left(\sqrt[n]{\varepsilon_{сум}} - 1 \right), \quad (2)$$

где L – длина хода круга, м; $\varepsilon_{сум} = t / y = \varepsilon^n$ – суммарное уточнение.

С увеличением n основное время обработки τ непрерывно уменьшается, асимптотически приближаясь к минимальному значению

$$\tau_{min} = \frac{\sigma \cdot H \cdot L}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \cdot \ln \varepsilon_{сум}. \quad (3)$$

Следовательно, существенно уменьшить основное время обработки τ (с учетом ограничения по точности обрабатываемой поверхности) можно за счет увеличения количества проходов круга $n \rightarrow \infty$ и скорости детали $V_{дет} \rightarrow \infty$. Однако реализовать на практике это условие нельзя, т.к. оба указанных параметра должны быть конечными величинами. В связи с этим произведем оценку степени уменьшения основного времени обработки τ для конечных значений n и $V_{дет}$. Для этого преобразуем зависимости (2) и (3) к виду

$$\tau = \frac{\sigma \cdot H \cdot L}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \cdot \alpha_1, \quad (4)$$

$$\tau_{min} = \frac{\sigma \cdot H \cdot L}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \cdot \alpha_2, \quad (5)$$

где $\alpha_1 = n \cdot \left(\sqrt[n]{\varepsilon_{сум}} - 1 \right)$; $\alpha_2 = \ln \varepsilon_{сум}$ – безразмерные величины.

На рис. 1,а приведены расчетные значения безразмерной величины α_1 , а также пунктирными линиями показаны значения α_2 для разных значений $\varepsilon_{сум}$, приведенных в табл. 1. Как видно, с увеличением n безразмерная величина α_1 непрерывно уменьшается, асимптотически приближаясь к минимальному значению α_2 . Наиболее интенсивно происходит уменьшение величины α_1 на первых двух проходах круга. Из этого вытекает, что с точки зрения уменьшения основного времени обработки τ эффективно производить многопроходное шлифование, поскольку один и тот же припуск (в данном случае равной глубине шлифования t) при многопроходном шлифовании можно удалить значительно быстрее, чем при однопроходном шлифовании. Причем, с увеличением номинальной глубины шлифования t (соответственно суммарного уточнения $\varepsilon_{сум}$) эффект обработки усиливается, т.к. отношение наибольшего и наименьшего значений τ увеличивается.

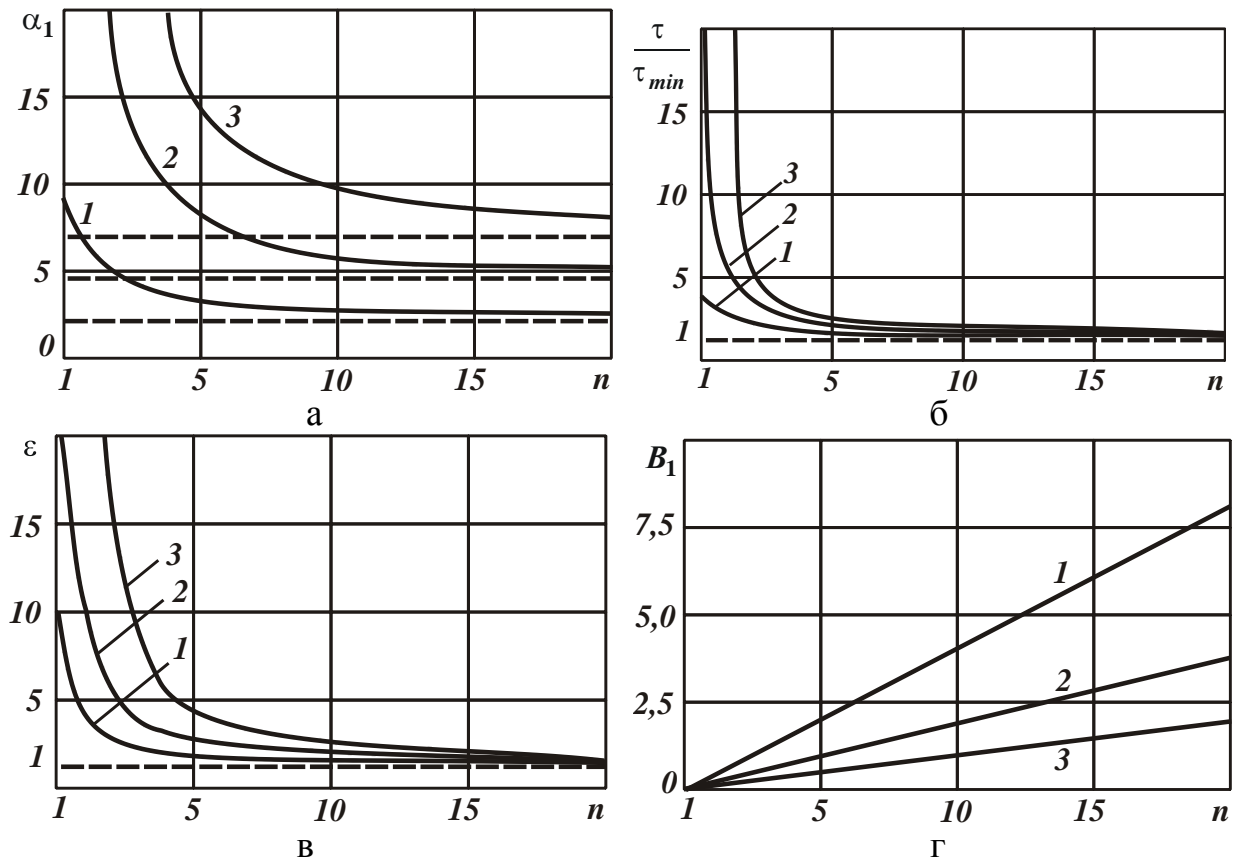


Рис. 1. Зависимости величин α_1 (а), τ/τ_{min} (б), ϵ (в) и B_1 (г) от n : 1 – $\epsilon_{сум} = 10$; 2 – $\epsilon_{сум} = 100$; 3 – $\epsilon_{сум} = 1000$.

С увеличением n различие значений α_1 для $\epsilon_{сум} = 10$ и $\epsilon_{сум} = 1000$ существенно уменьшается. Так, если при $n=1$ значения α_1 отличаются в 100 раз, то при достижении наименьшего основного времени обработки τ_{min} (соответствующего значению α_2) – всего в 3 раза (табл. 1). Следовательно, с целью уменьшения основного времени обработки τ съем припуска целесообразно осуществлять с максимально возможным суммарным уточнением $\epsilon_{сум}$ и соответственно максимальной глубиной шлифования t , поскольку с увеличением t основное время обработки τ_{min} увеличивается незначительно.

Таблица 1

Расчетные значения безразмерной величины α_2

$\epsilon_{сум}$	10	100	1000
α_2	2,3	4,6	7

На рис. 1,б приведены рассчитанные по зависимости

$$\frac{\tau}{\tau_{min}} = \frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{n \cdot (\sqrt[n]{\epsilon_{сум}} - 1)}{\ln \epsilon_{сум}} \quad (6)$$

значения τ/τ_{min} . Как видно, с увеличением $\varepsilon_{сум}$ значения τ/τ_{min} существенно увеличиваются. Однако это происходит в небольшом диапазоне изменения количества проходов круга $n=1\dots4$. При дальнейшем увеличении n это отличие становится небольшим, а при $n=128$ практически исчезает.

На рис. 1, в приведены расчетные значения уточнения $\varepsilon = \sqrt[n]{\varepsilon_{сум}}$, достигаемые на каждом проходе круга. Относительно большие значения ε реализуются на первых двух проходах. При дальнейшем увеличении n уточнение ε уменьшается и принимает весьма малые значения, близкие к единице. Это означает, что и отношение t/y на каждом проходе круга изменяется по такому же закону, т.е. величина упругого перемещения y незначительно отличается от номинальной глубины шлифования t .

Между параметрами $\varepsilon_{сум}$ и $B_1 = t_\phi / y$ существует следующая связь

$$\left(1 + \frac{1}{B_1}\right) = \sqrt[n]{\varepsilon_{сум}}. \quad (7)$$

На основе данной зависимости можно определить безразмерный параметр B_1 (рис. 1, г). Как видно, параметр B_1 изменяется в весьма больших пределах, принимая значения как меньшие, так и большие единицы. На первых двух проходах параметр B_1 меньше единицы для всех рассматриваемых значений $\varepsilon_{сум}$. Начиная с 16 прохода, он принимает значения, большие единицы. Следовательно, на первых проходах фактическая глубина шлифования t_ϕ больше величины упругого перемещения y , а при дальнейшем увеличении n , наоборот, меньше величины y . Это свидетельствует о значительной доле в балансе шлифования упругих перемещений, возникающих в технологической системе.

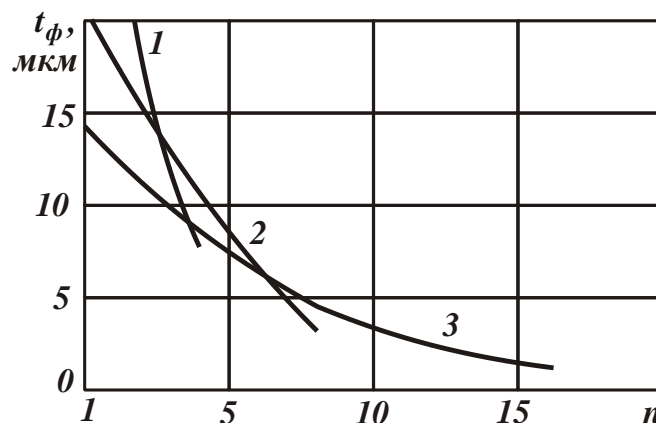


Рис. 2. Характер изменения фактической глубины шлифования t_ϕ по проходам круга: 1 – $n=2$; 2 – $n=4$; 3 – $n=8$; 4 – $n=16$.

Необходимо отметить, что безразмерный параметр B_1 позволяет принципиально по-новому раскрыть физические закономерности процесса

шлифования. Данный параметр выражает связь между фактической глубиной шлифования t_ϕ и величиной упругого перемещения y , т.е. между параметрами, которые не задаются (как, например, параметры режима шлифования), а являются внутренними параметрами шлифования. Следовательно, безразмерный параметр B_1 является обобщающим, позволяющим установить новые внутренние связи между параметрами шлифования. Собственно, благодаря использованию безразмерного параметра B_1 получены выше приведенные решения. По сути, безразмерный параметр B_1 имеет такое же значение для теории шлифования (и в целом для технологии машиностроения) как уточнение ε . Их отличие состоит в том, что $B_1 = t_\phi / y$ выражает связь между фактической глубиной шлифования t_ϕ и величиной упругого перемещения y , а уточнение $\varepsilon = t / y$ выражает связь между номинальной глубиной шлифования t и величиной упругого перемещения y . Очевидно, рассматривая эти параметры в совокупности, появляется возможность более полного представления о физических закономерностях и технологических возможностях процесса шлифования.

Зная характер изменения параметра B_1 , можно оценить характер изменения скорости детали $V_{дет}$ в зависимости от n . Судя по приведенной

выше формуле: $B_1 = \frac{\sigma \cdot H \cdot V_{дет}}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}$, скорость детали $V_{дет}$ прямо

пропорционально связана с B_1 . Поэтому с увеличением n скорость детали $V_{дет}$ также будет непрерывно увеличиваться, изменяясь в значительных пределах. Следовательно, эффект снижения основного времени обработки τ с увеличением n обусловлен увеличением $V_{дет}$, т.е. чем больше $V_{дет}$, тем выше эффект обработки. Очевидно, при съеме припуска за один проход скорость детали $V_{дет}$ будет значительно меньше, чем при многопроходном шлифовании. Из этого можно заключить, что добиться существенного уменьшения τ можно установлением максимально возможной скорости детали, реализуемой на станке. Оптимальная скорость детали $V_{дет}$ определяется из зависимости

$$V_{дет} = \frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}{\sigma \cdot H} \cdot B_1. \quad (8)$$

Значения B_1 принимаются из рис. 1,г, а значения σ , $K_{ш}$ и c устанавливаются расчетно-экспериментальным путем. Например, для исходных данных: $B_1=1,4$; $\sigma=1500$ кГс/мм²; $K_{ш}=0,3$; $c=1000$ кГс/мм; $V_{кр}=30$ м/с; $H=10$ мм скорость детали $V_{дет}$ равна 50 м/мин.

Зная параметр ε (рис. 1,в) можно установить характер изменения по проходам круга фактической глубины шлифования t_ϕ для заданной величины y . На рис. 2 приведены расчетные значения t_ϕ для $y=10$ мкм (

$\varepsilon_{\text{сум}}=10$; $t=100$ мкм). Как видно, с увеличением n фактическая глубина шлифования t_{ϕ} непрерывно уменьшается, принимая относительно небольшие значения при $n \geq 8$ по сравнению с однопроходным шлифованием ($n = 1$).

Заслуживает особого внимания тот факт, что с увеличением n наблюдается более равномерное распределение значений фактической глубины шлифования t_{ϕ} по проходам (рис. 2). Следовательно, с увеличением n можно обработку, по сути, производить с одинаковой фактической глубиной шлифования t_{ϕ} и это существенно не повлияет на минимально возможное значение основного времени обработки τ_{min} . Иными словами, появляется возможность перехода от обработки с переменной глубиной шлифования по проходам (при выхаживании) к обработке с постоянной глубиной шлифования, реализуемой при шлифовании по жесткой схеме. На основе сказанного можно заключить, что с увеличением n и скорости детали $V_{\text{дет}}$ до значений скорости круга $V_{\text{кр}}$ при обработке по схеме выхаживания и при многопроходном шлифовании по жесткой схеме можно реализовать одни и те же значения τ_{min} и величины y . Несомненно, это открывает новые возможности повышения производительности и точности обработки на финишных операциях.

Таким образом, обоснованы технологические закономерности уменьшения основного времени обработки τ при одновременном обеспечении заданной точности обрабатываемой поверхности. Полученные теоретические решения справедливы для схемы выхаживания, когда сьем материала происходит без поперечной подачи под действием упруго-восстанавливающей силы, возникающей в технологической системе. Этим, собственно, и обусловлено уменьшение фактической глубины шлифования t_{ϕ} по проходам круга.

Используя зависимость (5), определим максимально возможную производительность обработки при шлифовании

$$Q_{\text{max}} = \frac{\mathcal{G}}{\tau_{\text{min}}} = \frac{c \cdot K_{\text{ш}} \cdot V_{\text{кр}} \cdot t}{\sigma \cdot \ln \varepsilon_{\text{сум}}} = \frac{c \cdot K_{\text{ш}} \cdot V_{\text{кр}}}{\sigma} \cdot \alpha_3, \quad (9)$$

где $\mathcal{G} = L \cdot H \cdot t$ – объем снятого материала, м³; $\alpha_3 = t / \ln \varepsilon_{\text{сум}}$ – размерный параметр.

По сути, Q_{max} определяет производительность многопроходного шлифования, реализуемой с достаточно высокой скоростью детали $V_{\text{дет}}$ и при достаточно большом количестве проходов круга n . Как следует из (9), а также из рис. 3, добиться увеличения Q_{max} можно увеличением параметров c , $K_{\text{ш}}$, $V_{\text{кр}}$, t , y и уменьшением σ . Эффект увеличения Q_{max} с увеличением t обусловлен тем, что функция τ_{min} , определяемая (5), изменяется не по линейной зависимости с увеличением t . В связи с этим происходит

увеличение размерного параметра α_3 с увеличением t . Поэтому с точки зрения увеличения Q_{max} при условии обеспечения заданной точности обработки (определяемой величиной y) эффективно в технологической системе создавать начальный натяг, равный величине снимаемого припуска (глубине шлифования t).

Из зависимости (9) следует, что чем меньше величина упругого перемещения y , тем меньше Q_{max} . Это указывает на то, что чем выше требования к точности обработки, тем меньше Q_{max} .

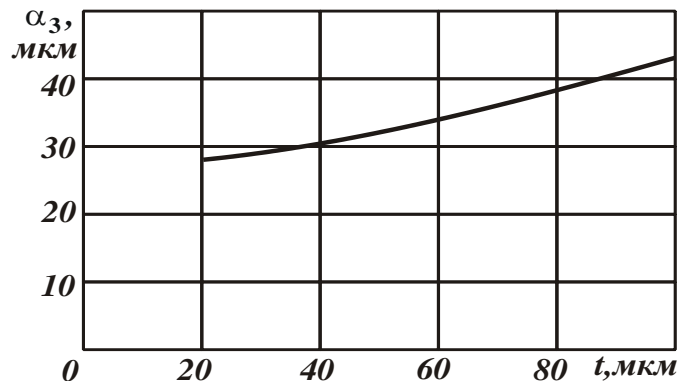


Рис. 3. Зависимость размерного параметра α_3 от глубины шлифования t .

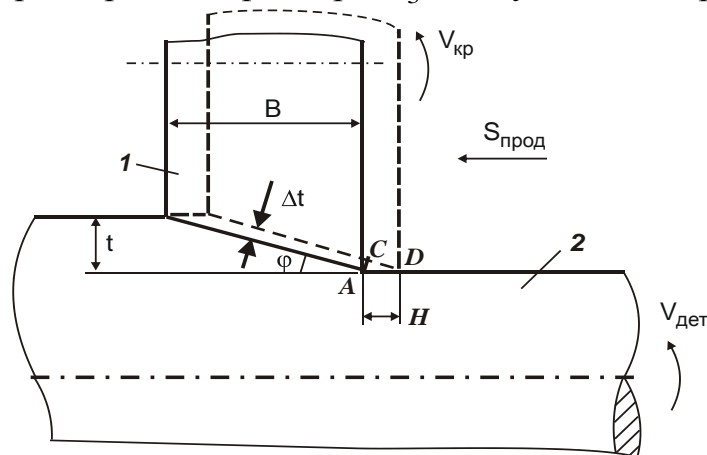


Рис. 4. Расчетная схема круглого наружного продольного глубинного шлифования: 1 – круг; 2 – деталь.

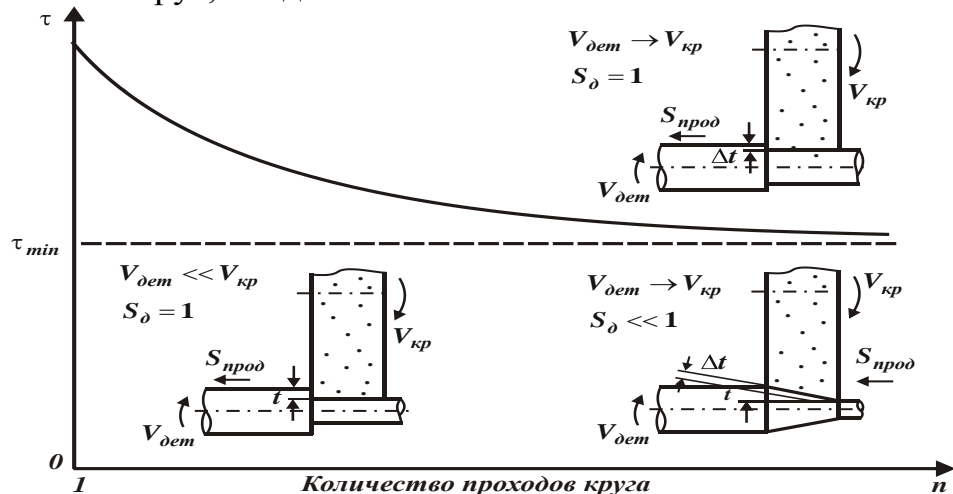


Рис. 5. Расположение трех принципиальных схем шлифования по уровню достигаемого основного времени обработки τ .

Как отмечалось выше, данное теоретическое решение получено применительно к схеме выхаживания, когда фактическая глубина шлифования t_ϕ уменьшается с увеличением n (рис. 2) и при $n \geq 8$ принимает относительно небольшие значения, характерные для многопроходного шлифования. При этом значения t_ϕ более равномерно распределяются по проходам круга. Используя данное решение, можно (в первом приближении) перейти от схемы выхаживания (с переменной по проходам t_ϕ) к жесткой схеме многопроходного шлифования, реализуя на каждом проходе одинаковую глубину шлифования. Очевидно, чем меньше будет глубина шлифования на каждом проходе и соответственно больше V_{dem} , тем меньше будет расхождение достигаемого основного времени обработки τ с минимальным значением τ_{min} и больше производительность. Увеличивая V_{dem} до значения скорости круга ($V_{dem} \rightarrow V_{кр}$), можно выполнить условие $\tau \rightarrow \tau_{min}$. Практически реализовать данное условие можно, применяя схему многопроходного врезного шлифования всей шириной круга или схему продольного глубинного шлифования с весьма малой долевой продольной подачей $S_\delta \ll 1$. Используя, например, схему глубинного шлифования, можно практически весь припуск удалить за один проход, устанавливая глубину шлифования t , равной величине снимаемого припуска. В этом случае глубина шлифования, приходящаяся на один оборот детали (при круглом наружном шлифовании), будет значительно меньше установочной глубины шлифования t , равной величине снимаемого припуска. Для ее определения рассмотрим расчетную схему (рис. 4).

Как известно, при продольном шлифовании с долевой продольной подачей значительно меньше единицы на шлифовальном круге всегда образуется заборный конус с углом φ . Вследствие этого, фактическая глубина шлифования Δt будет значительно меньше установочной глубины шлифования $t=0,15$ мм. Так, исходя из прямоугольного треугольника ACD

(рис. 4), имеем $\frac{\Delta t}{H} = \sin \varphi$, откуда $\Delta t = H \cdot \sin \varphi$. С другой стороны,

$\sin \varphi = \frac{t}{\sqrt{B^2 + t^2}} \approx \frac{t}{B}$. Тогда $\Delta t = H \cdot \frac{t}{B} = \frac{H}{B} \cdot t$. Для исходных данных: $t=0,15$

мм; $V_{dem}=50$ м/мин; $B=63$ мм; $H=2,2$ мм/об, получено $S_\delta = \frac{H}{B} = \frac{2,2}{63} \approx 0,035$,

соответственно $\Delta t = 0,035 \cdot 0,15$ мм = 5,2 мкм. В результате достигается незначительная фактическая глубина шлифования Δt .

Исходя из рис. 4, от схемы глубинного шлифования можно перейти к схеме врезного многопроходного шлифования всей шириной круга, рассматривая глубину шлифования Δt – равной $t \cdot S_\delta$, которая меньше глубины шлифования при глубинном продольном шлифовании в $1/S_\delta$ раз (где $S_\delta = H/B < 1$ – долевая продольная подача). Следовательно, глубина

шлифования Δt является номинальной при круглом наружном врезном многопроходном шлифовании.

Необходимо отметить, что случай однопроходного шлифования ($n=1$), согласно рис. 1,а, может быть реализован на практике путем применения схемы глубинного шлифования с относительно небольшой скоростью детали $V_{дет} \ll V_{кр}$ и соответственно $S_{\delta}=1$. По сравнению со схемой продольного глубинного шлифования с $V_{дет} \rightarrow V_{кр}$ и $S_{\delta} \ll 1$, данная схема характеризуется меньшей производительностью обработки, т.к. основное время обработки τ больше (рис. 1,а). На рис. 5 схематично показано расположение трех рассмотренных (принципиальных) схем шлифования по уровню достигаемого основного времени обработки τ (при условии обеспечения заданной точности обработки). Очевидно, наименьшее основное время обработки $\tau \rightarrow \tau_{min}$ достигается при продольном глубинном шлифовании с $S_{\delta} \ll 1$ и врезном многопроходном шлифовании всей шириной круга ($S_{\delta}=1$) с относительно большой скоростью детали $V_{дет} \rightarrow V_{кр}$. Глубинное шлифование с $S_{\delta}=1$ и относительно небольшой скоростью детали $V_{дет} \ll V_{кр}$ характеризуется значительно большим основным временем обработки τ и соответственно меньшей производительностью обработки. Таким образом, теоретически обоснованы основные условия повышения производительности обработки при обеспечении требуемой точности обрабатываемой поверхности (рис. 6) и доказана перспективность применения кинематических схем глубинного и многопроходного шлифования, реализующих относительно большие скорости детали $V_{дет}$.

Полученная применительно к упругой схеме выхаживания зависимость (9) для определения Q_{max} , будет справедлива и при шлифовании по жесткой схеме, т.к. данная схема также характеризуется конечной жесткостью технологической системы c . Производительность обработки при врезном многопроходном шлифовании с $S_{\delta}=1$ описывается зависимостью

$$Q_{max} = H \cdot V_{дет} \cdot \Delta t, \quad (10)$$

где Δt – номинальная глубина шлифования, м.

Рассматривая в зависимости (9) установочную глубину шлифования t (по аналогии с процессом выхаживания) как условный начальный натяг, создаваемый в технологической системе, справедливо соотношение $\Delta t = t/n$. Скорость детали в данном случае определяется (8), в которой параметр B_1 задан. Следовательно, неизвестным параметром режима шлифования остается лишь параметр H , который можно установить, подставляя зависимость (10) в (9):

$$H = \frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр} \cdot n}{\sigma \cdot V_{дет} \cdot \ln \varepsilon_{сум}}. \quad (11)$$

Чем больше n , тем больше H . С увеличением t (соответственно суммарного уточнения $\varepsilon_{сум}$) ширина шлифования H уменьшается, однако не

столь существенно в силу нелинейности функции $\ln \varepsilon_{\text{сум}}$. При продольном глубинном шлифовании справедлива зависимость $Q_{\text{max}} = S_{\delta} \cdot H \cdot V_{\text{дет}} \cdot t$. Подставляя данную зависимость в (9) с учетом $n = 1/S_{\delta}$, имеем

$$H = \frac{c \cdot K_{\text{ш}} \cdot V_{\text{кр}}}{\sigma \cdot S_{\delta} \cdot V_{\text{дет}} \cdot \ln \varepsilon_{\text{сум}}} = \frac{c \cdot K_{\text{ш}} \cdot V_{\text{кр}} \cdot n}{\sigma \cdot V_{\text{дет}} \cdot \ln \varepsilon_{\text{сум}}}. \quad (12)$$



Рис. 6. Структурная схема условий повышения производительности при обеспечении заданной точности обработки при круглом наружном шлифовании.

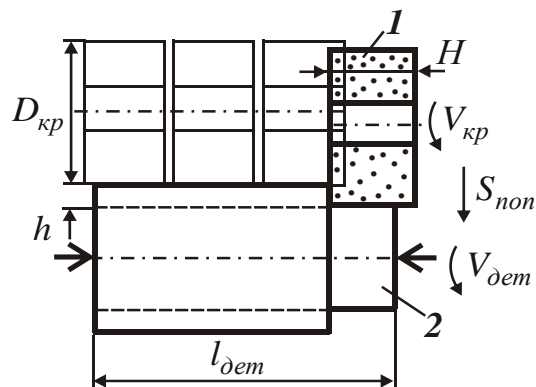


Рис. 7. Схема шлифования последовательными врезаниями – с радиальной подачей уступами: 1 – круг; 2 – обрабатываемая деталь.

Зависимости (11) и (12) идентичны. Следовательно, с точки зрения производительности обработки обе рассматриваемые схемы круглого наружного шлифования равносильны, т.е. с одинаковой эффективностью можно применять как схему продольного глубинного шлифования, так и схему врезного многопроходного шлифования. Из зависимости (9) также следует, что увеличивая параметры c , $K_{ш}$, $V_{кр}$, t и уменьшая условное напряжение резания (энергоемкость обработки) σ для заданной величины упругого перемещения y , можно существенно увеличить производительность обработки.

Как показано выше, при условии $S_\delta \approx 1$ реализуется схема круглого наружного врезного многопроходного шлифования всей шириной круга, что позволяет поддерживать прямолинейную направляющую круга и повышает точность и шероховатость обработки. По данной схеме можно производить шлифование последовательными врезаниями – с радиальной подачей уступами, обрабатывая последовательно все участки поверхности (рис. 7).

Коэффициент шлифования $K_{ш}$ и условное напряжение резания (энергоемкость обработки) σ , входящие в вышеприведенные зависимости, аналитически определяются следующим образом

$$K_{ш} = \frac{P_z}{P_y} = \frac{P_{zp} + P_{zmp}}{P_{yp} + P_{ymp}}, \quad (13)$$

где P_{zp} , P_{yp} – тангенциальная и радиальная составляющие силы резания в зоне стружкообразования, Н; P_{zmp} , P_{ymp} – тангенциальная и радиальная составляющие силы трения обрабатываемого материала со связкой круга, Н.

Установим закономерности изменения $K_{ш}$. Для этого тангенциальную составляющую силы резания $P_z = P_{zp} + P_{zmp}$ представим в виде

$$K_{ш} \cdot P_y = K_{шp} \cdot P_{yp} + f \cdot P_{ymp}, \quad (14)$$

где $K_{шp} = P_{zp} / P_{yp}$; $f = P_{zmp} / P_{ymp}$ – коэффициент трения обрабатываемого материала со связкой круга.

С учетом $P_{ymp} = P_y - P_{yp}$ зависимость (14) можно преобразовать

$$\frac{(K_{шp} - K_{ш})}{(K_{шp} - f)} = \frac{P_{ymp}}{P_y}. \quad (15)$$

В итоге получена достаточно сложная зависимость, увязывающая четыре неизвестных параметра: $K_{ш}$, $K_{шp}$, f и P_{ymp} с одним известным параметром P_y .

Проведем анализ данной зависимости для двух случаев: $P_{ymp} / P_y = 0$ и $P_{ymp} / P_y < 1$. Первый случай предполагает отсутствие трения связки круга с обрабатываемым материалом, в результате чего выполняется условие $K_{ш} = K_{шp}$. Во втором случае справедливо условие: $K_{шp} - K_{ш} < K_{шp} - f$ или $K_{ш} > f$.

Причем, с увеличением соотношения P_{ymp}/P_y расхождение параметров $K_{ш}$ и $K_{шр}$ усиливается, однако, до определенного предела $K_{ш} \rightarrow f$, т.к. при условии $K_{ш} < f$ числитель зависимости (15) становится больше знаменателя, а это теряет физический смысл. Из этого вытекает, что при $P_{ymp}/P_y \rightarrow 1$ справедливо условие $K_{ш} \rightarrow f$. В обобщенном виде характер зависимости коэффициента шлифования $K_{ш}$ от соотношения P_{ymp}/P_y при одинаковом значении $K_{шр}$ показан на рис. 8,а.

Как видно, увеличение коэффициента шлифования $K_{ш}$ предполагает уменьшение соотношения P_{ymp}/P_y , что соответствует уменьшению доли энергии трения связки круга с обрабатываемым материалом в общем энергетическом балансе процесса шлифования и повышению эффективности обработки. Для удобства анализа зависимость (13) может быть представлена в виде

$$K_{ш} = K_{шр} \cdot \left(1 - \frac{P_{ymp}}{P_y}\right) + f \cdot \frac{P_{ymp}}{P_y}. \quad (16)$$

При $P_{ymp}/P_y = 0$ справедливо условие $K_{ш} = K_{шр}$. При увеличении соотношения $P_{ymp}/P_y \rightarrow 1$ первое слагаемое зависимости (16) уменьшается до нуля, а второе увеличивается до значения f . Следовательно, имеет место экстремальная зависимость коэффициента шлифования $K_{ш}$ от соотношения P_{ymp}/P_y . Для определения экстремума функции $K_{ш}$ подчиним ее необходимому условию экстремума. Для этого возьмем первую производную от функции $K_{ш}$ по переменной P_{ymp}/P_y и полученное выражение приравняем нулю. В результате установлено, что $K_{ш} = f$.

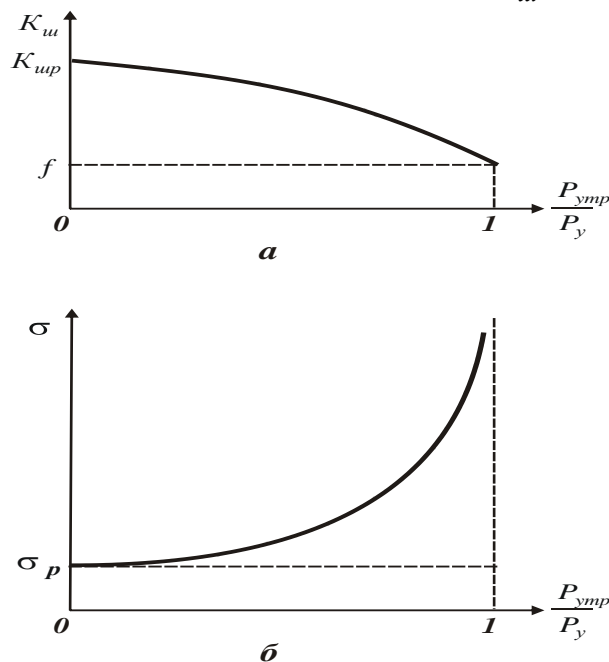


Рис. 8. Общий вид зависимостей $K_{ш}$ (а) и σ (б) от P_{ymp}/P_y .

Вторая производная от функции $K_{и}$ по переменной P_{ymp}/P_y равна нулю. Следовательно, экстремум функции $K_{и}$ по переменной P_{ymp}/P_y отсутствует. Поэтому коэффициент шлифования $K_{и}$ с увеличением соотношения P_{ymp}/P_y (от 0 до 1) будет непрерывно уменьшаться от значения $K_{иp}$ до значения f , т.е. при $P_{ymp}/P_y \rightarrow 1$ выполняется условие $K_{и} \rightarrow f$, что соответствует графику, приведенному на рис. 8,а. Параметр σ опишем следующей аналитической зависимостью $\sigma = P_z/S_{cym}$. С учетом $P_z = P_{zp} + P_{zmp}$, имеем

$$\sigma = \sigma_p + \sigma_{mp}, \quad (17)$$

где $\sigma_p = P_{zp}/S_{cym}$; $\sigma_{mp} = P_{zmp}/S_{cym}$; S_{cym} – мгновенная суммарная площадь поперечного сечения среза всеми одновременно работающими зернами круга, м².

Выразим

$$P_{zmp} = f \cdot P_{ymp} = f \cdot (P_y - P_{yp}) = f \cdot \left(\frac{P_z}{K_{и}} + \frac{P_{zp}}{K_{иp}} \right). \quad (18)$$

Подставляя зависимость (18) в (17), приходим к уравнению относительно σ :

$$\sigma = \sigma_p + f \cdot \left(\frac{\sigma}{K_{и}} + \frac{\sigma_p}{K_{иp}} \right). \quad (19)$$

Разрешим полученное уравнение (19) относительно σ :

$$\sigma = \sigma_p \cdot \frac{\left(1 - \frac{f}{K_{иp}} \right)}{\left(1 - \frac{f}{K_{и}} \right)}. \quad (20)$$

Таким образом, получена аналитическая зависимость для определения энергоемкости обработки при шлифовании. Переменным параметром здесь является коэффициент шлифования $K_{и}$. Нетрудно видеть, что с уменьшением коэффициента шлифования $K_{и}$ энергоемкость обработки σ увеличивается.

Подчиним зависимость (20) расчетным данным, приведенным на рис. 8,а, согласно которым $K_{и}$ изменяется в пределах от значения $K_{иp}$ до значения f . Поэтому при условии $K_{и} = K_{иp}$, имеем $\sigma = \sigma_p$, а при условии $K_{и} \rightarrow f$ соответственно $\sigma \rightarrow \infty$ (рис. 8,б). Следовательно, с увеличением соотношения P_{ymp}/P_y (т.е. с переходом от процесса резания к процессу трения связки круга с обрабатываемым материалом) энергоемкость обработки при шлифовании σ неограниченно увеличивается. Собственно

этим объясняется высокая силовая и тепловая напряженность процесса шлифования и возникающие на обрабатываемых поверхностях прижоги и другие температурные дефекты. Поэтому уменьшить энергоемкость обработки при шлифовании можно, прежде всего, за счет снижения интенсивности трения связки круга с обрабатываемым материалом, т.е. за счет уменьшения в зависимости (20) второго слагаемого σ_{mp} . Представим зависимость (20) в виде суммы двух слагаемых ($\sigma = \sigma_p + \sigma_{mp}$), обусловленных процессами резания и трения связки круга с материалом:

$$\sigma = \sigma_p + \sigma_p \cdot \frac{\left(1 - \frac{f}{K_{up}}\right)}{\left(1 - \frac{f}{K_{un}}\right)} - \sigma_p = \sigma_p + \sigma_p \cdot \frac{\left(\frac{1}{K_{un}} - \frac{1}{K_{up}}\right)}{\left(\frac{1}{f} - \frac{1}{K_{un}}\right)} = \sigma_p + \sigma_p \cdot \frac{f}{K_{up}} \cdot \frac{(K_{up} - K_{un})}{(K_{un} - f)}. \quad (21)$$

В результате получена зависимость, в которой первое и второе слагаемые связаны между собой. Очевидно, второе слагаемое больше первого, т.к. изменяется от значения σ_p (при $K_{un} = K_{up}$) до бесконечности (при $K_{un} = f$).

Выразим K_{un} через P_{ymp} / P_y , определяемое зависимостью (16):

$$\sigma = \sigma_p + \sigma_p \cdot \frac{f}{K_{up}} \cdot \frac{\left(\frac{P_{ymp}}{P_y}\right)}{\left(1 - \frac{P_{ymp}}{P_y}\right)} = \sigma_p + \sigma_p \cdot \frac{f}{K_{up}} \cdot \frac{1}{\left(\frac{P_y}{P_{ymp}} - 1\right)}. \quad (22)$$

Как видно, при условии $P_{ymp} / P_y = 0$, имеем $\sigma = \sigma_p$, а при условии $P_{ymp} / P_y = 1$ соответственно $\sigma \rightarrow \infty$. Аналогичный результат был получен выше на основе анализа зависимости (18), графически представленной на рис. 8,б.

Таким образом, из зависимости (22) следует, что уменьшить энергоемкость обработки σ можно путем уменьшения параметров P_{ymp} / P_y , σ_p , f и увеличением K_{up} . Это хорошо согласуется с практикой алмазного и абразивного шлифования. В табл. 2 приведены расчетные значения

безразмерной величины $\alpha_3 = \frac{1}{\left(\frac{P_y}{P_{ymp}} - 1\right)}$, входящей в зависимость (22).

Таблица 2

Расчетные значения безразмерной величины α_3

P_{ymp} / P_y	0	0,25	0,5	0,75	1,0
α_3	0	0,33	1,0	3,0	∞

Учитывая то, что отношение f / K_{up} может изменяться приблизительно в пределах $0,3 \dots 1,0$, первое и второе слагаемые зависимости будут равны между собой при условии $P_{ymp} / P_y \approx 0,5 \dots 0,75$. При превышении данных значений P_{ymp} / P_y второе слагаемое зависимости больше первого и энергоемкость обработки σ будет неограниченно увеличиваться. Таким образом показано, что энергоемкость обработки при шлифовании σ вполне однозначно определяется соотношением P_{ymp} / P_y . С его увеличением параметр σ неограниченно увеличивается, что обусловлено преобладанием энергии трения связки круга с материалом в общем энергетическом балансе процесса шлифования.

Преобразуем зависимость (22) с учетом следующих выражений: $P_y = P_{yp} + P_{ymp} = c \cdot y_1 + c \cdot y_2$; $y_1 = t - t_\phi$; $y_2 = n \cdot (t - t_\phi)$, где y_1 и y_2 – величины упругих перемещений, возникающих в технологической системе, от действия сил P_{yp} ; P_{ymp} ; t_ϕ – фактическая глубина шлифования; n – количество проходов круга. Тогда

$$\frac{1}{\left(\frac{P_{ymp}}{P_y} - 1\right)} = \frac{1}{\left(\frac{y_1 + y_2}{y_2} - 1\right)} = \frac{y_2}{y_1} = n, \quad (23)$$

$$\sigma = \sigma_p + \sigma_p \cdot \frac{f}{K_{up}} \cdot n. \quad (24)$$

В зависимости (24) роль безразмерной величины α_3 выполняет параметр n . С его увеличением энергоемкость обработки σ неограниченно увеличивается. При условии $n > K_{up} / f$ второе слагаемое зависимости (22), обусловленное трением связки круга с обрабатываемым материалом, больше первого слагаемого. Преобразуем величину σ_p :

$$\sigma_p = \frac{P_{zp} \cdot V_{кр}}{Q_\phi} = \frac{K_{up} \cdot P_{yp} \cdot V_{кр}}{B \cdot V_{дет} \cdot t_\phi} = \frac{K_{up} \cdot c \cdot y \cdot V_{кр}}{B \cdot V_{дет} \cdot t_\phi} = \frac{K_{up} \cdot c \cdot (t - t_\phi) \cdot V_{кр}}{B \cdot V_{дет} \cdot t_\phi} = \frac{K_{up} \cdot c \cdot V_{кр}}{B \cdot V_{дет}} \cdot \left(\frac{t}{t_\phi} - 1\right) \quad (25)$$

Подставляя зависимость (25) в (24), имеем

$$\sigma = \sigma_p + \frac{c \cdot f \cdot V_{кр}}{B \cdot V_{дет}} \cdot n \cdot \left(\frac{t}{t_\phi} - 1\right). \quad (26)$$

Второе слагаемое зависимости (26) равно величине σ_{mp} . Таким образом показано, что с физической точки зрения энергоемкость обработки обусловлена различием фактической и номинальной глубин шлифования t_ϕ / t , а также количеством проходов круга n . При условии $t_\phi \rightarrow t$ (что

достигается обеспечением высокой режущей способности круга) энергоемкость обработки уменьшается.

Выводы. 1. Теоретически обоснована возможность повышения точности и производительности обработки на основе применения кинематической схемы круглого наружного продольного глубинного шлифования с долевой продольной подачей, значительно меньшей единицы, и скоростью детали, соизмеримой со скоростью круга.

2. Аналитически установлено, что энергоемкость обработки при шлифовании в общем виде определяется соотношением радиальной составляющей силы резания, обусловленной трением связи круга с обрабатываемым материалом, и суммарной радиальной составляющей силы резания. Увеличение данного соотношения в пределах от 0 до 1 вызывает неограниченное увеличение энергоемкости обработки, что и является причиной чрезвычайно высоких значений энергоемкости обработки при шлифовании, достигаемых на практике.

3. Теоретически обоснованы основные условия уменьшения энергоемкости обработки. Они состоят в обеспечении примерного равенства фактической и номинальной производительности обработки; в увеличении номинальной и фактической производительности обработки; в применении относительно мягких кругов, полностью или частично компенсирующих возникновение упругих перемещений в технологической системе за счет размерного износа шлифовального круга и обеспечения его работы в режиме самозатачивания.

4. Апробация полученных теоретических решений в производственных условиях ОАО "Азовмаш" подтвердила их достоверность и эффективность практического использования. В дальнейших исследованиях требуется обосновать оптимальные характеристики абразивных кругов для реализации предложенных схем шлифования.

Список литературы

1. Рыбицкий В.А. Опыт внедрения алмазного шлифования деталей с защитными покрытиями / В.А. Рыбицкий – К.: Общество "Знание" УССР, 1987. – 23 с.

2. Новиков Г.В. Повышение эффективности алмазно-искрового шлифования деталей с высокопрочными покрытиями: автореф. дис. на соискание научн. степени канд. техн. наук: спец. 05.02.08 / Одес. политехн. ун-т. – Одесса, 1990. – 19 с.

3. Рыжов Э.В. Технологическое обеспечение качества деталей с покрытиями / Э.В. Рыжов, С.А. Клименко, О.Г. Гуцаленко. – К.: Наук. думка, 1994. – 180 с.

4. Новиков Ф.В. Оптимизация структуры и параметров операций шлифования плоских и внутренних цилиндрических поверхностей деталей / Ф.В. Новиков, Р.А. Бережной. // Вісник Харківського національного

технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. – Харків: ХНТУСГ, 2010. – Вип. 101. – С. 28-39.

Новиков Ф.В. Физические и кинематические основы высокопроизводительного алмазного шлифования: автореф. дис. на соискание научн. степени докт. техн. наук: спец. 05.03.01 / Одес. гос. политехн. ун-т. – Одесса, 1995. – 36 с.