

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ И ПАРАМЕТРОВ ОПЕРАЦИИ КРУГЛОГО НАРУЖНОГО ВРЕЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ

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

(Харьковский национальный экономический университет,

ОАО Харьковский машиностроительный завод “Свет шахтера”)

Введение и постановка задачи. Обработка материалов резанием по-прежнему остается основным методом формообразования поверхностей деталей машин и в ближайшее время не утратит своей значимости. Поэтому задачи, связанные с повышением ее эффективности, являются чрезвычайно важными и актуальными, направленными на создание конкурентноспособной отечественной машиностроительной продукции. В успешном решении этих задач большое значение имеет совершенствование методов финишной обработки и в особенности окончательного шлифования деталей машин, поскольку на машиностроительных предприятиях, как правило, параметры точности и качества обработки формируются на операциях шлифования. Наглядным примером тому является производство в ОАО ХМЗ “Свет шахтера” ответственных деталей типа вал приводов шахтных конвейеров (планетарных редукторов мощностью более 200 кВт). Это валы, валы–шестерни, колеса, муфты, водила, зубчатые венцы, приводные звездочки и т.д. Данные детали габаритны по размерам, изготавливаются из низкоуглеродистых легированных сталей, после предварительной лезвийной обработки подвергаются цементации и закалке (токами высокой частоты) до высокой твердости HRC 62–65, затем шлифуются. При работе в шахтных условиях данные детали испытывают большие механические нагрузки, поэтому к ним предъявляются достаточно высокие требования по точности и качеству обработки, в особенности по точности размера обрабатываемых поверхностей. Например, при обработке цилиндрических поверхностей ступенчатых валов диаметром до 200 мм и более точность размера составляет 0,002–0,008 мм, шероховатость обработки – на уровне $R_a = 0,2$ мкм.

Согласно действующей технологии, предварительная обработка ступенчатых валов редукторов производится методом продольного точения, а окончательная обработка – методами продольного и врезного шлифования, шлифованием последовательными врезаниями – с радиальной подачей ступенями. В последнем случае с целью повышения точности обработки заключительный этап шлифования выполняется с дополнительным осциллирующим движением круга в продольном направлении.

Обеспечение высоких показателей точности и качества обработки требует установления больших припусков (до 1 мм на сторону), что приводит к существенному увеличению продолжительности операций шлифования. Так, продолжительность одного врезания круга при съеме припуска до 1 мм на сторону составляет свыше 5 минут. Высокая продолжительность обработки обусловлена также необходимостью постоянного контроля на круглошлифовальном станке с “ручным” управлением рабочим-шлифовщиком размера обрабатываемой поверхности. Вместе с тем, обеспечить стабильно требуемые параметры точности размера и геометрической формы обрабатываемой поверхности (некруглости и нецилиндричности) не удается.

Как показывает практика шлифования, относительно низкие показатели точности и производительности обработки могут быть обусловлены недостаточной жесткостью технологической системы, что приводит к образованию значительных упругих перемещений, которые в конечном итоге определяют точность обработки. Следовательно, для повышения точности обработки необходимо уменьшить деформации технологической системы за счет снижения силовой напряженности процесса шлифования. Соответственно, это требует уменьшения параметров режима шлифования и производительности обработки, что очевидно, мало эффективно. Таким образом, возникает противоречивая задача, связанная с необходимостью повышения точности обработки без снижения производительности шлифования. Решить ее можно, прежде всего, путем повышения эффективности операций круглого наружного шлифования на основе оптимизации их структуры и параметров.

Необходимо отметить, что в данном направлении накоплен достаточно большой практический опыт. Разработаны и широко применяются круглошлифовальные станки с ЧПУ повышенной жесткости, позволяющие автоматизировать процесс шлифования и значительно сократить вспомогательное время обработки. Разработаны нормативы режимов шлифования с учетом требований по точности обработки. Однако, они построены с использованием экспериментальных данных, полученных для частных условий шлифования, что не дает общего представления о технологических возможностях операций шлифования в плане повышения точности и производительности обработки.

Важным направлением решения задачи повышения точности обработки без снижения производительности обработки является применение методов структурно-параметрической оптимизации для определения оптимальной структуры и параметров операции шлифования [1, 2]. Вместе с тем, данные методы основаны опять же на эмпирических зависимостях основных параметров шлифования, полученных экспериментально для определенных диапазонов изменения параметров режима шлифования, характеристик круга и обрабатываемой детали. Это связано с тем, что в научно-технической литературе фактически отсутствуют аналитические зависимости для определения параметров точности

обработки, которые позволили бы раскрыть физическую сущность их формирования под воздействием упругих перемещений, образующихся в технологической системе, и обосновать наиболее перспективные направления повышения точности и производительности обработки. В исследованиях мало внимания уделено оптимизации законов съема припуска с точки зрения обеспечения максимально возможной производительности обработки с учетом ограничений по точности и качеству обрабатываемых поверхностей. Знание этих законов необходимо для определения оптимальных маршрутов обработки, требуемого количества операций и переходов, а также других параметров обработки.

Целью работы является повышение эффективности операций круглого наружного шлифования ответственных валов приводов шахтных конвейеров на основе оптимизации их структуры и параметров по критерию наименьшего основного времени обработки с учетом ограничений по точности и шероховатости обрабатываемой поверхности.

Материалы и результаты исследований. Для достижения поставленной цели нами 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 [3, 4, 5]. Рассмотрим три принципиальные схемы круглого наружного врезного шлифования (рис.1): с дискретно изменяющейся во времени скоростью радиальной подачи и с дискретным характером контакта круга с обрабатываемой деталью; с непрерывно изменяющейся во времени скоростью радиальной подачи и с постоянным контактом круга с обрабатываемой деталью; с дискретно изменяющейся во времени скоростью радиальной подачи и с постоянным контактом круга с обрабатываемой деталью. В первом случае при шлифовании в n переходов основное время обработки τ определится:

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

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

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 зависимостями:

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

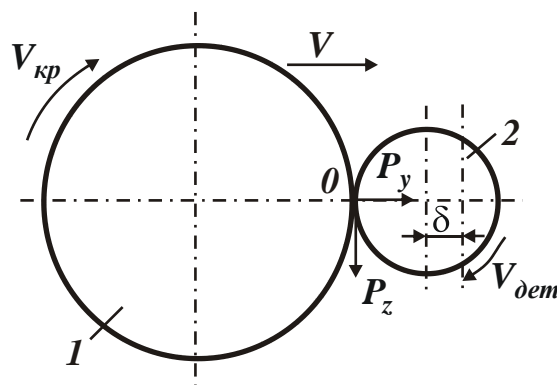


Рис. 1. Расчетная схема круглого врезного шлифования: 1 – круг; 2 – деталь.

При этом наибольшее и наименьшее значения основного времени обработки отличаются в 5 раз (рис. 2,б), что свидетельствует о важности исследования функции τ на экстремум и определения экстремальных значений параметров шлифования. В зависимостях (2) величина упругого перемещения на втором переходе δ_2 , по сути, определяет погрешность размера обработанной поверхности и она задается.

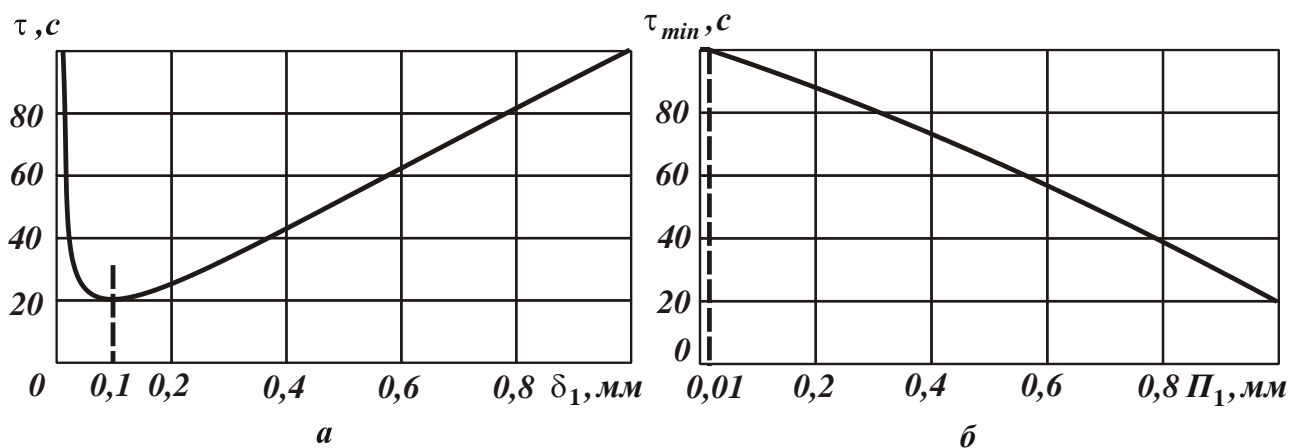


Рис. 2. Зависимость τ от δ_1 для $B=1\text{с}$, $\Pi_1=\Pi=1$ мм, $\delta_2=0,01$ мм (а) и зависимость τ_{min} от Π_1 для $B=1\text{с}$, $\Pi=1$ мм, $\delta_2=0,01$ (б).

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

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

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

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

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

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

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

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

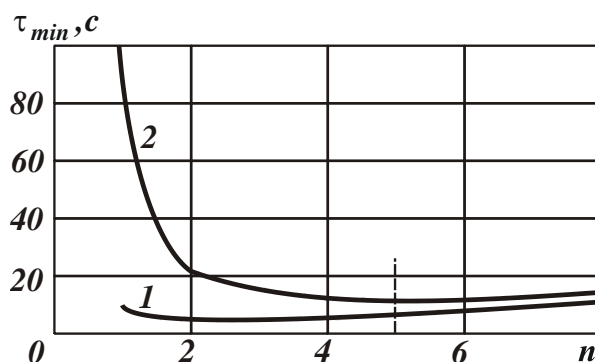


Рис. 3. Зависимость τ_{min} от n для разных значений $\varepsilon_{сум}$: 1 – $\varepsilon_{сум} = 10$; 2 – $\varepsilon_{сум} = 100$ ($B = 1с$).

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
$(\tau_{min})_{min}$	2,72	5,4	8,1	10,8	13,6	16,3	19,0	21,7

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

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

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

где a – коэффициент ($a=0,45-0,5$); $\varepsilon_{d0} = Td_{заг} / Td_{дем}$ – 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 $B=1c$

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 21,2с, а минимальное основное время обработки τ_{min} (при $m=e^0=1$) равно 5с. Соответственно их отношение равно 4. Этим показано, что для данной технологической системы наиболее эффективной схемой круглого врезного шлифования является схема, включающая переходы черного шлифования и выхаживания. По сравнению с оптимальной схемой обработки, реализующей лишь переход выхаживания и обеспечивающей минимум основного времени обработки, данная схема в 4 раза менее производительна. Это обусловлено достаточно большими значениями Π/δ и $m = \Pi/\delta_1$. Полученные теоретические решения хорошо согласуются с результатами экспериментальных исследований, которые выполнялись на круглошлифовальном станке мод. 3У143МВ с применением абразивного круга 1А1 400х80х203 24А 40 СМ1 К6 по схеме круглого наружного шлифования с режимом: $V_{кр}=35$ м/с; $V_{дет}=13,2$ м/мин. Продольная подача при этом была отключена. Обработывался вал из стали 45 диаметром 35 мм. Для поддержания высокой режущей способности абразивного круга периодически производилась его механическая правка алмазным карандашом “Славутич”, черновая правка с режимом: $t=0,4$ мм; $S_{прод}=1$ м/мин, чистовая правка: $t=0,2$ мм; $S_{прод}=0,5$ м/мин.

Первоначально проводились экспериментальные исследования по определению влияния скорости радиальной подачи V на величину упругого

перемещения δ в технологической системе при съеме припуска Π , равного 0,5 мм на сторону. Результаты исследования представлены на рис. 4.

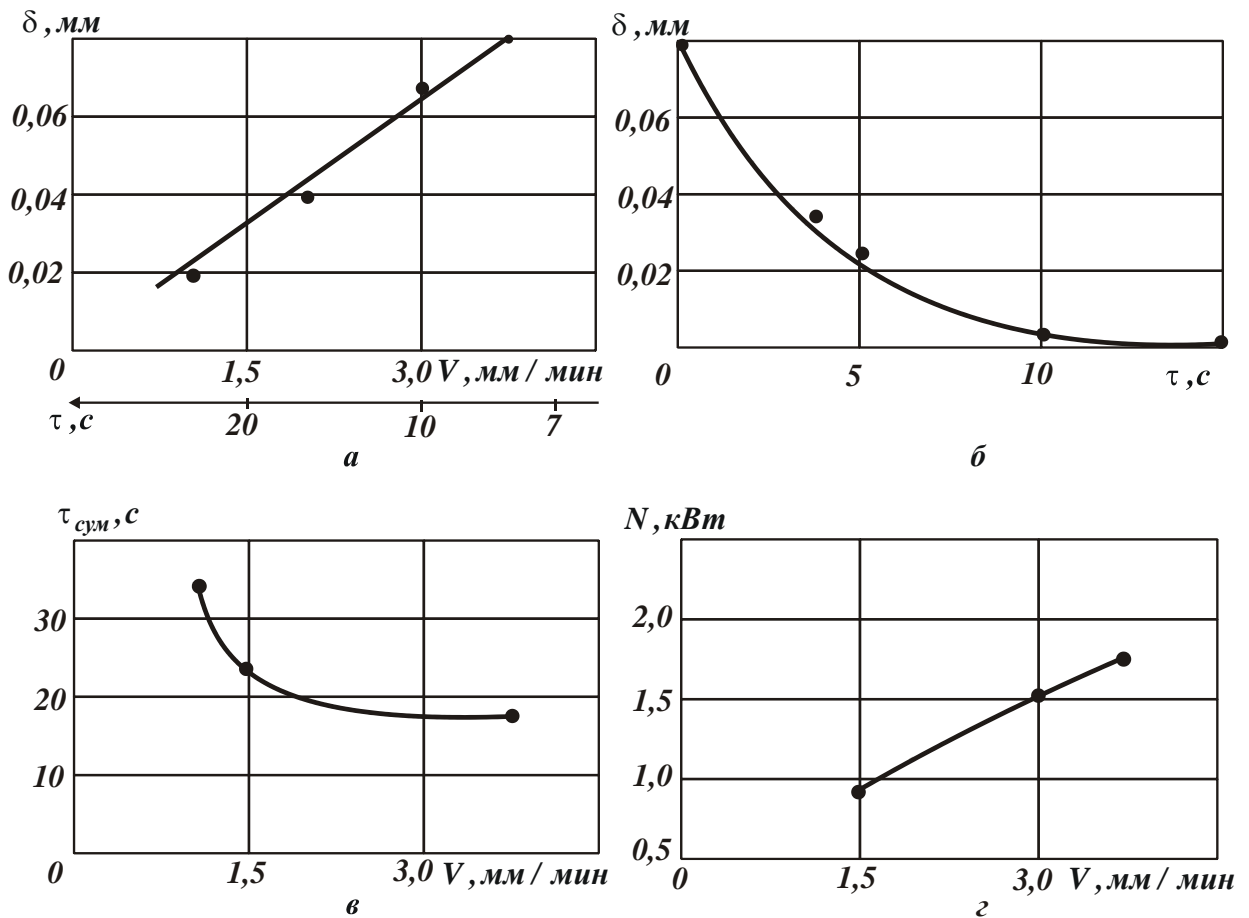


Рис. 4. Зависимости δ от V (времени обработки τ) при круглом врезном шлифовании (а) и δ от τ при выхаживании (б), зависимости суммарного времени обработки $\tau_{\text{сум}}$ (в) и эффективной мощности шлифования N (г) от скорости радиальной подачи V .

Как следует из рисунка, величина δ с изменением скорости радиальной подачи V изменяется примерно по линейной зависимости. Это подтверждает положенную в основу аналитических исследований зависимость $\delta = B \cdot V$, согласно которой связь между величинами δ и V линейная. Параметр B в данном случае выполняет роль коэффициента пропорциональности и равен $B = 1,2 \dots 1,28$ с. Следовательно, приведенные экспериментальные данные свидетельствуют о достоверности выполненных аналитических исследований. На рис. 4,а показана шкала изменения времени обработки $\tau = \Pi/V$, направленная в сторону, противоположную скорости радиальной подачи V , т.е. чем меньше τ , тем больше упругое перемещение δ .

Были проведены экспериментальные исследования по определению характера изменения величины упругого перемещения δ с течением времени выхаживания, т.е. при шлифовании с отключенной радиальной подачей. Для этого в технологической системе был создан начальный натяг величиной 0,08 мм. Как следует из рис. 4,б, с течением времени обработки τ величина

натяга (упругое перемещение δ) непрерывно уменьшается и через 10 с съём обрабатываемого металла практически прекращается (отсутствует искрообразование в зоне резания). Из рис. 4,б вытекает, что зависимость $\delta - \tau$ подчиняется экспоненциальному закону. Это согласуется с полученными аналитическими решениями.

Располагая экспериментальными данными времени обработки τ на переходах врезного шлифования (рис. 4,а) и выхаживания (рис. 4,б), можно определить суммарное время обработки $\tau_{\text{сум}}$ в зависимости от скорости радиальной подачи V . Для этого необходимо задать точность размера обрабатываемой поверхности. Например, $\delta = 0,003$ мм, что достигается через 10с шлифования по схеме выхаживания, рис. 4,б.

На рис. 4,в приведены результаты расчета $\tau_{\text{сум}}$ от V . Значения $\tau_{\text{сум}}$ получены суммированием времени обработки на переходах врезного шлифования и выхаживания для различных значений δ , взятых из рис. 4,а,б. Как следует из рис. 4,в, с увеличением скорости радиальной подачи V суммарное время обработки $\tau_{\text{сум}}$ уменьшается в связи с нелинейностью зависимости $\delta - \tau$ (рис. 4,б). Это хорошо согласуется с полученными аналитическими решениями, которыми доказано, что при съеме припуска по схеме выхаживания требуемая точность обработки достигается за меньшее время. Следовательно, чем большая часть припуска будет удаляться по схеме выхаживания, тем меньше время обработки.

С целью оценки режущей способности круга были проведены измерения эффективной мощности врезного шлифования N в зависимости от скорости радиальной подачи V . Как следует из рис. 4,г, с увеличением скорости V эффективная мощность шлифования N увеличивается почти по линейной зависимости, принимая значения на уровне 1...2 кВт.

Было определено также влияние скорости радиальной подачи V на твердость HRB и шероховатость R_a обработанной поверхности. Измерения твердости проводились на твердомере Роквелла в единицах HRB . Затем по таблицам перевода определялась твердость в единицах HB (например, для $V = 1,5$ мм/мин – $HB = 163...167$, для $V = 3,75$ мм/мин – $HB = 169...171$). В результате установлено, что с увеличением скорости радиальной подачи V твердость несколько увеличивается, рис. 5,а. Это свидетельствует о том, что в процессе шлифования происходит упрочнение обрабатываемого металла, т.е. преобладает силовой фактор. Роль температурного фактора незначительна, поскольку в противном случае наблюдалось бы уменьшение твердости обработанной поверхности. Таким образом показано, что скорость радиальной подачи V не является ограничением с точки зрения температурного фактора, приводящего к снижению качества обработки.

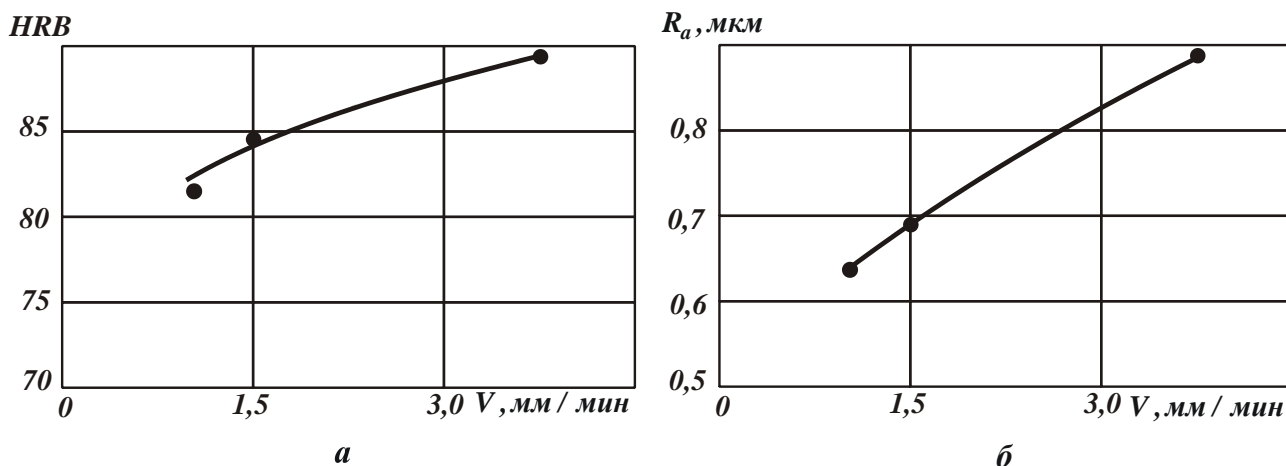


Рис. 5. Зависимости твердости обработанной поверхности HRB (а) и параметра шероховатости обработки R_a (б) от скорости радиальной подачи V .

На рис. 5,б показан характер изменения параметра шероховатости обработки R_a от скорости радиальной подачи V . Как видно, параметр R_a принимает достаточно большие значения, что связано со спецификой круглого наружного врезного шлифования. При круглом наружном продольном шлифовании параметр R_a , как нами установлено, принимает меньшие значения. Применение выхаживания уменьшает значения R_a , однако не столь существенно – лишь до уровня 0,3 мкм.

Выводы. В работе приведены новые теоретические решения по определению оптимальной структуры и параметров операции круглого наружного врезного шлифования, которые позволяют повысить производительность обработки при заданной точности размера обрабатываемой поверхности. Произведена экспериментальная проверка теоретических результатов и показана их достоверность.

Список литературы

1. Лурье Г.Б. Прогрессивные методы круглого наружного шлифования. – Л.: Машиностроение, Ленинград. отд-ние, 1984. – 103 с.
2. Кащук В.А., Верещагин А.Б. Справочник шлифовщика. – М.: Машиностроение, 1988. – 480 с.
3. Новиков Ф.В., Ковальчук А.Н. Оптимизация структуры процесса съема припуска при механической обработке // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Х.: НТУ "ХПІ". – 2005. – № 37. – С. 169-176.
4. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общей редакцией Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т.10. "Концепции развития технологии машиностроения" – Одесса: ОНПУ, 2005. – 565 с.
5. Ковальчук А.Н. Оптимизация структуры и параметров процесса съема припусков при шлифовании с непрерывно изменяющейся во времени скоростью радиальной подачи круга // Високі технології в машинобудуванні:

Збірник наукових праць Національного технічного університету
"Харківський політехнічний інститут". – Х.: НТУ "ХПІ". – 2006. – Вип. 2
(13). – С. 41-47.