

*batch of parts using a more productive tool. The efficiency of using a more productive tool, with increased indicators of cutting modes, is shown, even if it is expensive. The effectiveness of the application is due to the increased physical and mechanical properties of the tool material, its superior cutting performance and resistance.*

**Keywords:** *machining, cutting tools, Sandvik Coromant, economic analysis, cost reduction, stability, performance, efficiency.*

Рецензент: проф., д-р техн. наук Хавин Г. Л.

Статья поступила 27.02.2019 г.

УДК 621.924.56

Полянский В. И.

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ОБРАБОТКИ ПРИ ШЛИФОВАНИИ

*В работе определены условия уменьшения основного времени обработки на операции круглого врезного шлифования с учетом ограничения по точности обрабатываемой поверхности детали, определяемой упругими перемещениями, возникающими в технологической системе, за счет увеличения количества технологических переходов. Теоретически показано, что существует экстремум (минимум) основного времени обработки в зависимости от величины упругого перемещения на каждом из технологических переходов. На этой основе получены аналитические зависимости для определения скорости радиальной подачи на каждом переходе. Расчетами установлено, что наименьшее основное время обработки достигается при осуществлении операции круглого врезного шлифования в два перехода. Установлено также, что при выхаживании при заданной точности обрабатываемой поверхности основное время обработки значительно меньше, чем при дискретном характере уменьшения во времени скорости радиальной подачи.*

**Ключевые слова:** *круглое врезное шлифование, технологические переходы, основное время обработки, упругое перемещение, скорость радиальной подачи, выхаживание.*

**Постановка проблемы.** Важным фактором повышения точности и производительности механической обработки является уменьшение упругих перемещений, возникающих в технологической системе. Поэтому знание закономерностей их изменения позволяет научно обоснованно подходить к определению условий повышения точности и производительности обработки и в целом эффективности осуществления процесса резания. Наиболее важно располагать закономерностями изменения упругих перемещений в процессе шлифования, где окончательно формируются параметры качества и точности обрабатываемых поверхностей. Однако, на практике эти закономерности устанавливаются, как правило, на основе результатов экспериментальных исследований, полученных для частных условий обработки. В научно – технической литературе фактически отсутствуют результаты аналитических исследований закономерностей формирования параметров точности и производительности обработки с учетом упругих перемещений, возникающих в технологической системе при шлифовании. Это ограничивает возможности установления обобщенных закономерностей, справедливых в широких диапазонах изменения параметров шлифования. В связи с этим в работе решается актуальная задача теоретического определения условий повышения точности и производительности обработки на операции

круглого врезного шлифования на основе управления упругими перемещениями, возникающими в технологической системе.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Исследованию упругих перемещений, возникающих в технологической системе при механической обработке, посвящены работы [1, 2]. В работе [3] для определения упругого перемещения предложен эмпирический подход, основанный на результатах экспериментальных исследований силы резания, который, по сути, позволяет установить оптимальные условия обработки с учетом ограничения по точности, однако лишь для вполне заданных (ограниченных) диапазонов изменения параметров режима резания, характеристик инструмента и обрабатываемого материала.

В работе [4] предложен теоретический подход к определению упругих перемещений при круглом врезном шлифовании на основе аналитических зависимостей:

$$y = \frac{P_y}{c} = \frac{P_z}{K_{ш} \cdot c} = \frac{\sigma \cdot S_{мгн}}{K_{ш} \cdot c} = \frac{\sigma \cdot Q}{K_{ш} \cdot c \cdot V_{кр}} = \frac{\sigma \cdot H \cdot \pi \cdot D_{дет} \cdot V}{K_{ш} \cdot c \cdot V_{кр}} = B \cdot V, \quad (1)$$

где  $P_y = P_z / K_{ш}$  – радиальная составляющая силы резания, Н;  $P_z = \sigma \cdot S_{мгн}$  – тангенциальная составляющая силы резания, Н;  $K_{ш}$  – коэффициент шлифования;  $\sigma$  – условное напряжение резания, Н/м<sup>2</sup>;  $S_{мгн} = Q / V_{кр}$  – мгновенная суммарная площадь поперечного сечения среза всеми одновременно работающими зернами шлифовального круга, м<sup>2</sup>;  $Q = H \cdot \pi \cdot D_{дет} \cdot V$  – производительность обработки, м<sup>3</sup>/с;  $H$  – ширина шлифования, м;  $D_{дет}$  – диаметр обрабатываемой детали, м;  $V = \Pi / \tau$  – скорость радиальной подачи, м/с;  $\Pi$  – величина снимаемого припуска, м;  $\tau$  – основное время обработки, с;  $V_{кр}$  – скорость круга, м/с;  $c$  – приведенная жесткость технологической системы в радиальном направлении, Н/м;  $B = \frac{\sigma \cdot H \cdot \pi \cdot D_{дет}}{K_{ш} \cdot c \cdot V_{кр}}$ .

Применение этих аналитических зависимостей значительно расширяет возможности поиска оптимальных технологических решений, поскольку входящие в зависимости параметры могут изменяться в широких пределах. Это открывает новые перспективы решения оптимизационных задач определения условий повышения точности и производительности обработки при круглом врезном шлифовании. Поэтому, используя предложенный теоретический подход, важно провести исследования по установлению взаимосвязей между возникающими в технологической системе упругими перемещениями, точностью и производительностью обработки на операции круглого врезного шлифования. В конечном итоге это позволит научно обоснованно подходить к выбору оптимальных условий обработки и разработке эффективных технологических процессов шлифования.

**Цель работы** – аналитическое определение и анализ путей повышения точности и производительности обработки на операции круглого врезного шлифования на основе управления упругими перемещениями, возникающими в технологической системе.

**Изложение основного материала.** Как следует из зависимости (1), основным условием уменьшения упругого перемещения  $y$  является уменьшение отношения  $\sigma / K_{ш}$ , скорости  $V = \Pi / \tau$  и увеличение параметров  $c$ ,  $V_{кр}$ . Однако при съеме относительно большого припуска основное время обработки  $\tau$  может быть относительно большим. Поэтому для оценки возможности его уменьшения рассмотрим операцию круглого врезного

## Машинобудування і зварювальне виробництво

шлифования, осуществляемую в два технологических перехода: врезание шлифовального круга в обрабатываемую деталь до упора со скоростью радиальной подачи  $V_1$ , затем отвод его на величину  $y_1$  и повторное врезание круга в обрабатываемую деталь до упора с меньшей скоростью  $V_2$ . Тогда основное время обработки определится:

$$\tau = \frac{\Pi}{V_1} + \frac{y_1}{V_2}. \quad (2)$$

Величины упругого перемещения  $y_1$  и  $y_2$ , возникающие на первом и втором технологических переходах операции шлифования, определяются зависимостями:

$$y_1 = \frac{\sigma \cdot H \cdot \pi \cdot D_{\text{дем}} \cdot V_1}{K_{\text{ш}} \cdot c \cdot V_{\text{кр}}}; \quad (3)$$

$$y_2 = \frac{\sigma \cdot H \cdot \pi \cdot D_{\text{дем}} \cdot V_2}{K_{\text{ш}} \cdot c \cdot V_{\text{кр}}}. \quad (4)$$

Разрешая зависимости (3) и (4) относительно скоростей  $V_1$ ,  $V_2$  и, подставляя полученные выражения в зависимость (2), имеем:

$$\tau = \frac{\sigma \cdot H \cdot \pi \cdot D_{\text{дем}}}{K_{\text{ш}} \cdot c \cdot V_{\text{кр}}} \cdot \left( \frac{\Pi}{y_1} + \frac{y_1}{y_2} \right) = B \cdot \left( \frac{\Pi}{y_1} + \frac{y_1}{y_2} \right). \quad (5)$$

В итоге получена экстремальная зависимость относительно неизвестной величины  $y_1$ , рассматривая величину  $y_2$  заданной, определяемой точностью обработки. Для определения экстремального значения  $y_1$  зависимость (5) следует подчинить необходимому условию экстремума  $\tau'_{y_1} = 0$ :

$$\tau'_{y_1} = B \cdot \left( -\frac{\Pi}{y_1^2} + \frac{1}{y_2} \right) = 0. \quad (6)$$

Откуда:

$$y_{1\text{экстр}} = \sqrt{\Pi \cdot y_2}. \quad (7)$$

Подставляя экстремальное значение  $y_{1\text{экстр}} = \sqrt{\Pi \cdot y_2}$  в зависимость (5), имеем:

$$\tau_{\text{экстр}} = B \cdot \left( \sqrt{\frac{\Pi}{y_2}} + \sqrt{\frac{\Pi}{y_2}} \right) = B \cdot \left( 2 \cdot \sqrt{\frac{\Pi}{y_2}} \right). \quad (8)$$

## Машинобудування і зварювальне виробництво

Для определения характера экстремума (минимума или максимума) следует определить вторую производную от функции  $\tau$ :

$$\tau''_{y_1} = B \cdot \frac{2 \cdot \Pi}{y_1^3}. \quad (9)$$

Как видно, справедливо условие  $\tau''_{y_1} > 0$ . Следовательно, функция  $\tau$  в точке экстремума принимает минимальное значение.

Необходимо отметить, что при осуществлении операции круглого врезного шлифования в один технологический переход основное время обработки определяется зависимостью

$$\tau = \frac{\Pi}{V_1} = B \cdot \frac{\Pi}{y_1}. \quad (10)$$

Рассматривая в зависимостях (10) и (8) отношения  $\Pi/y_1$  и  $\Pi/y_2$  одинаковыми, из табл. 1 следует, что во втором случае, начиная от значения  $\Pi/y_2=4$ , основное время обработки меньше, т.е. эффективно операцию шлифования осуществлять в два технологических перехода.

Таблица 1 – Расчетные значения основного времени обработки при шлифовании в один и два технологических перехода при условии  $B=1$

$\Pi/y_2$	2	4	9	11	16	25	36
$\tau = \Pi/y_1$	2	4	9	11	16	25	36
$\tau_{экстр} = 2 \cdot \sqrt{\Pi/y_2}$	2,83	4	6	6,63	8	10	12

При меньших значениях  $\Pi/y_2 < 4$  целесообразно съём припуска производить в один технологический переход со скоростью радиальной подачи  $V_1$ .

Как следует из зависимости (8), основное время обработки на каждом из двух технологических переходов шлифования одинаково, несмотря на различие величин  $y_1$  и  $y_2$ . Это обусловлено различием скоростей радиальной подачи  $V_1$  и  $V_2$  (где  $V_1 > V_2$ ), которые, исходя из зависимостей (3) и (4), определяются:

$$V_1 = \frac{K_{ш} \cdot c \cdot V_{кр} \cdot y_1}{\sigma \cdot H \cdot \pi \cdot D_{дет}} = \frac{K_{ш} \cdot c \cdot V_{кр} \cdot \sqrt{\Pi \cdot y_2}}{\sigma \cdot H \cdot \pi \cdot D_{дет}}; \quad (11)$$

$$V_2 = \frac{K_{ш} \cdot c \cdot V_{кр} \cdot y_2}{\sigma \cdot H \cdot \pi \cdot D_{дет}}; \quad (12)$$

$$\frac{V_1}{V_2} = \sqrt{\frac{\Pi}{y_2}}. \quad (13)$$

Из зависимости (13) следует, что чем больше отношение  $\Pi / y_2$ , тем больше должно быть различие скоростей радиальной подачи  $V_1$  и  $V_2$ .

С физической точки зрения одинаковые значения основного времени обработки на каждом из двух технологических переходов обусловлены одинаковыми значениями уточнения на размер [3]:  $\varepsilon_1 = \Pi / y_1 = \sqrt{\Pi / y_2}$  и  $\varepsilon_2 = y_1 / y_2 = \sqrt{\Pi / y_2}$ , которые входят в зависимость (5). По сути, и отношение скоростей радиальной подачи  $V_1 / V_2$ , исходя из зависимости (13), определяется уточнением на размер  $\varepsilon_1$ , т.е.  $V_1 / V_2 = \varepsilon_1$ .

Суммарное уточнение на размер равно:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 = \frac{\Pi}{y_1} \cdot \frac{y_1}{y_2} = \frac{\Pi}{y_2}. \quad (14)$$

Как видно,  $\varepsilon = \varepsilon_1^2$ , поскольку  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$ . Тогда,  $\varepsilon_1 = \sqrt{\Pi / y_2}$ . Подставляя значения  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  в зависимость (5), приходим к зависимости (8). Таким образом показано, что решить задачу минимизации основного времени обработки на операции круглого врезного шлифования, выполняемой в два технологических перехода с разными скоростями радиальной подачи  $V_1$  и  $V_2$ , можно на основе двух теоретических подходов. В первом случае – на основе использования необходимого условия экстремума, во втором случае – пользуясь классическим понятием уточнения на размер [3]. В итоге в двух случаях приходим к идентичным решениям.

При съеме припуска в три технологических перехода основное время обработки определяется:

$$\tau = B \cdot \left( \frac{\Pi}{y_1} + \frac{y_1}{y_2} + \frac{y_2}{y_3} \right), \quad (15)$$

где  $y_3 = B \cdot V_3$  – упругое перемещение, возникающее в технологической системе на третьем переходе, м;  $V_3$  – скорость радиальной подачи на третьем переходе, м/с.

В данном случае значение  $y_3$  задано и определяет точность обрабатываемой поверхности при шлифовании.

Экстремальное (минимальное) основное время обработки на первых двух технологических переходах шлифования определяется зависимостью (8). Тогда зависимость (15) можно представить:

$$\tau = B \cdot \left( 2 \cdot \sqrt{\frac{\Pi}{y_2}} + \frac{y_2}{y_3} \right). \quad (16)$$

Для определения экстремального (минимального) основного времени обработки на трех технологических переходах шлифования следует зависимость (16) подчинить необходимому условию экстремума  $\tau'_{y_2} = 0$ :

$$\tau'_{y_2} = B \cdot \left( -\sqrt{\frac{\Pi}{y_2^3}} + \frac{1}{y_3} \right) = 0. \quad (17)$$

Откуда:

$$y_{2\text{экстр}} = \sqrt[3]{\Pi \cdot y_3^2}. \quad (18)$$

Подставляя экстремальное значение  $y_{2\text{экстр}} = \sqrt[3]{\Pi \cdot y_3^2}$  в зависимость (16), имеем:

$$\tau_{\text{экстр}} = B \cdot \left( 2 \cdot \sqrt[3]{\frac{\Pi}{y_3}} + \sqrt[3]{\frac{\Pi}{y_3}} \right) = B \cdot \left( 3 \cdot \sqrt[3]{\frac{\Pi}{y_3}} \right). \quad (19)$$

Вторая производная:

$$\tau''_{y_2} = B \cdot \frac{1,5 \cdot \sqrt{\Pi}}{y_2^{2,5}}. \quad (20)$$

Как видно, справедливо условие  $\tau''_{y_2} > 0$ . Следовательно, функция  $\tau$  в точке экстремума принимает минимальное значение.

Исходя из зависимостей (15) и (19), получено:

$$\frac{\Pi}{y_1} = \frac{y_1}{y_2} = \frac{y_2}{y_3} = \sqrt[3]{\frac{\Pi}{y_3}}, \quad (21)$$

откуда,

$$y_1 = \sqrt[3]{\Pi^2 \cdot y_3}. \quad (22)$$

Тогда,

$$V_1 = \frac{K_{ш} \cdot c \cdot V_{кр} \cdot y_1}{\sigma \cdot H \cdot \pi \cdot D_{дет}} = \frac{K_{ш} \cdot c \cdot V_{кр} \cdot \sqrt[3]{\Pi^2 \cdot y_3}}{\sigma \cdot H \cdot \pi \cdot D_{дет}}; \quad (23)$$

$$V_2 = \frac{K_{ш} \cdot c \cdot V_{кр} \cdot \sqrt[3]{\Pi \cdot y_3^2}}{\sigma \cdot H \cdot \pi \cdot D_{дет}}; \quad (24)$$

$$V_3 = \frac{K_{ш} \cdot c \cdot V_{кр} \cdot y_3}{\sigma \cdot H \cdot \pi \cdot D_{дет}}; \quad (25)$$

$$\frac{V_1}{V_2} = \sqrt[3]{\frac{\Pi}{y_3}}; \quad (26)$$

$$\frac{V_2}{V_3} = \sqrt[3]{\frac{\Pi}{y_3}}. \quad (27)$$

Как видно, уточнение на размер на каждом технологическом переходе шлифования одинаково и равно  $\sqrt[3]{\frac{\Pi}{y_3}}$ , также как и  $\frac{V_1}{V_2} = \frac{V_2}{V_3} = \sqrt[3]{\frac{\Pi}{y_3}}$ , т. е. с каждым последующим технологическим переходом скорость радиальной подачи уменьшается.

В табл. 2 приведены расчетные значения основного времени обработки при шлифовании в три технологических перехода при условии  $B=1$ .

Таблица 2 – Расчетные значения основного времени обработки при шлифовании в три технологических перехода

$\Pi / y_3$	2	4	9	11	16	25	31	36
$\tau_{экстр} = 3 \cdot \sqrt[3]{\Pi / y_3}$	3,78	4,8	6,24	6,69	7,56	8,8	9,45	10

При условии  $\Pi / y_1 < 11$  значения основного времени обработки при шлифовании в три технологических перехода больше, чем при шлифовании в два перехода (табл. 1), а при условии  $\Pi / y_1 > 11$ , наоборот. Поэтому целесообразно осуществление операции шлифования в три перехода при условии  $\Pi / y_1 > 11$ .

Аналогично определено экстремальное (минимальное) значение основного времени при шлифовании в четыре и в  $n$  технологических переходов:

$$\tau_{экстр} = B \cdot \left( 4 \cdot \sqrt[4]{\frac{\Pi}{y_4}} \right); \quad (28)$$

$$\tau_{экстр} = B \cdot \left( n \cdot \sqrt[n]{\frac{\Pi}{y_n}} \right), \quad (29)$$

где  $y_4 = B \cdot V_4$  – упругое перемещение, возникающее в технологической системе, на четвертом переходе, м;  $y_n = B \cdot V_n$  – упругое перемещение, возникающее в технологической системе, на  $n$ -ом переходе, м;  $V_4, V_n$  – скорости радиальной подачи на четвертом и  $n$ -ом переходах, м/с.

В табл. 3 приведены расчетные значения основного времени обработки при шлифовании в четыре технологических перехода при условии  $B=1$ .

Таблица 3 – Расчетные значения основного времени обработки при шлифовании в четыре технологических перехода

$\Pi / y_4$	2	4	9	16	25	31	36
$\tau_{экстр} = 4 \cdot \sqrt[4]{\Pi / y_4}$	4,76	5,66	6,93	8	8,94	9,44	9,8

Сравнивая значения основного времени при шлифовании в три и четыре технологических перехода, приведенные в табл. 2 и табл. 3, видно, что при условии  $\Pi / y_3 < 31$  эффективно шлифование производить в три перехода, а при условии  $\Pi / y_3 > 31$  – в четыре перехода, поскольку в этих случаях обеспечивается наименьшее основное время обработки.

На рис. 1 графически показаны зависимости  $\tau_{экстр}$  от отношения  $\Pi / y_n$  для различных значений  $n$ . Как видно, при условии  $n \geq 2$  значения  $\tau_{экстр}$  отличаются не столь существенно по сравнению со случаем  $n = 1$ . Следовательно, применение операции круглого врезного шлифования в два технологических перехода позволяет при условии  $\Pi / y_2 > 2$  добиться наиболее ощутимого уменьшения  $\tau_{экстр}$ . Этим объясняется эффективность применения на практике операции круглого врезного шлифования, включающей предварительное и окончательное шлифование.

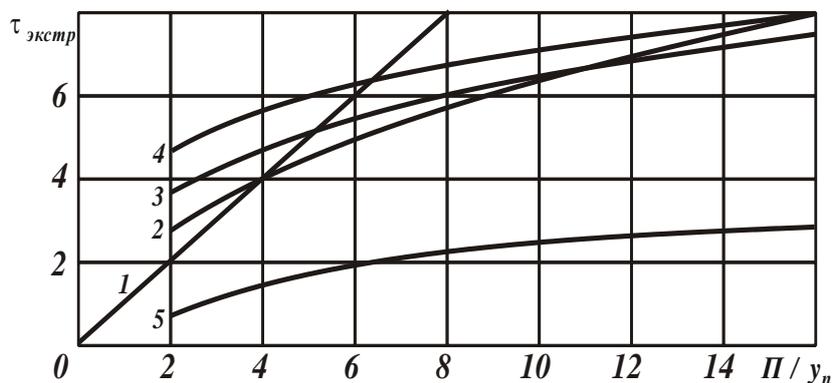


Рисунок 1 – Зависимость  $\tau_{экстр}$  от отношения  $\Pi / y_n$ :

1 –  $n = 1$ ; 2 –  $n = 2$ ; 3 –  $n = 3$ ; 4 –  $n = 4$ ; 5 – выхаживание

При более высоких значениях отношения  $\Pi / y_n$  целесообразно шлифование производить в три и более технологических переходов. Это позволит дополнительно уменьшить  $\tau_{экстр}$ , однако, как следует из рис. 1, незначительно.

Для более полного представления о технологических возможностях круглого врезного шлифования, осуществляемого с окружной скоростью детали  $V_{дет}$  (рис. 2), необходимо уточнить приведенные выше аналитические решения для определения упругого перемещения, возникающего в технологической системе, и основного времени обработки. Для этого следует воспользоваться приведенной в работе [5] аналитической зависимостью для определения упругого перемещения, возникающего в технологической системе при круглом врезном шлифовании с постоянной радиальной скоростью  $V_0$ :

## Машинобудування і зварювальне виробництво

$$y = B \cdot V_0 \cdot \left(1 - e^{-\frac{\tau}{B}}\right) + y_0 \cdot e^{-\frac{\tau}{B}}, \quad (30)$$

где  $y_0$  – начальный натяг в технологической системе, м.

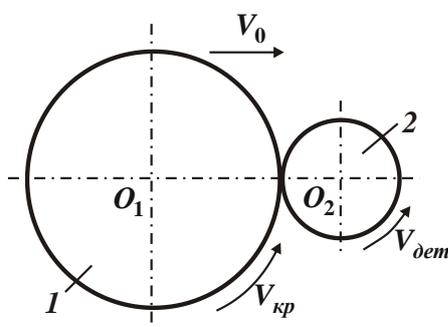


Рисунок 2 – Расчетная схема круглого врезного шлифования:  
1 – шлифовальный круг; 2 – обрабатываемая деталь

Как видно, упругое перемещение  $y$  определяется суммой двух слагаемых, первое из которых определяет упругое перемещение, возникающее в технологической системе при круглом врезном шлифовании по жесткой схеме (с постоянной радиальной скоростью  $V_0$ ). Второе слагаемое определяет упругое перемещение, возникающее в технологической системе в процессе выхаживания (с отключенной радиальной подачей), т. е. при шлифовании по упругой схеме. В первом случае, упругое перемещение (при условии  $y_0 = 0$ ) определяется зависимостью:

$$y = B \cdot V_0 \cdot \left(1 - e^{-\frac{\tau}{B}}\right) = y_{уст} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\tau}{B}}\right), \quad (31)$$

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

Как следует из рис. 3, с течением времени обработки  $\tau$  упругое перемещение  $y$  непрерывно увеличивается, асимптотически приближаясь к установившемуся значению  $y_{уст}$ .

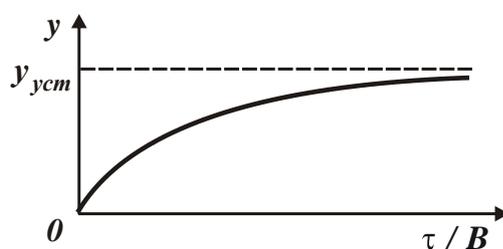


Рисунок 3 – Зависимость упругого перемещения  $y$  от отношения  $\tau / B$

С учетом  $V_0 = \Pi / \tau$  зависимости (31) можно представить в виде уравнения:

$$1 - \frac{y}{\Pi} \cdot \frac{\tau}{B} = e^{-\frac{\tau}{B}}. \quad (32)$$

В табл. 4 приведенные рассчитанные на основе уравнения (32) значения основного времени обработки  $\tau$  в зависимости от отношения  $\Pi/y$  при условии  $B=1$ .

Таблица 4 – Расчетные значения основное время обработки  $\tau$

$\Pi/y$	2	4	9	10	16	25	36	49
$\tau$	1,58	3,9	9	10	16	25	36	49

Сравнивая полученные расчетные значения  $\tau$  с аналогичными значениями основного времени обработки  $\tau$  (табл. 1), полученными при круглом врезном шлифовании, осуществляемом в один технологический переход (для одинаковых значений  $\Pi/y$  и  $\Pi/y_2$ ), видно, что в диапазоне  $\Pi/y < 4$  наблюдается расхождение сравниваемых значений  $\tau$ , тогда как в диапазоне  $\Pi/y > 4$  они фактически совпадают. Это указывает на достоверность приведенного упрощенного решения определения основного времени обработки  $\tau$  в широком диапазоне изменения величины  $\Pi/y$ .

Почти полное совпадение сравниваемых значений  $\tau$  в диапазоне  $\Pi/y > 4$  указывает на то, что упругое перемещение  $y$  принимает значения, близкие к установившемуся значению  $y_{уст}$  (рис. 3). Следовательно, с достаточной для практики точностью расчетов основного времени обработки  $\tau$  можно использовать приведенные выше упрощенные аналитические решения.

При шлифовании по схеме выхаживания зависимость (30) с учетом условия  $y_{уст} = B \cdot V_0 = 0$  принимает вид:

$$y = y_0 \cdot e^{-\frac{\tau}{B}}. \quad (33)$$

Рассматривая величину  $y_0$  равной снимаемому припуску  $\Pi$ , на основе зависимости (33) можно определить основное время обработки  $\tau$  (табл. 5):

$$\frac{y}{\Pi} = e^{-\frac{\tau}{B}}. \quad (34)$$

Таблица 5 – Расчетные значения основного времени обработки  $\tau$  при условии  $B=1$

$\Pi/y$	2	4	9	16	25	36	49	64
$\tau$	0,7	1,39	2,2	2,78	3,21	3,59	3,89	4,2

Сравнивая расчетные значения  $\tau$  (табл. 5) с соответствующими значениями  $\tau_{экстр}$  (табл. 1 – табл. 4), видно, что они значительно меньше. Это указывает на эффективность применения схемы выхаживания по сравнению с осуществлением операции круглого врезного шлифования по жесткой схеме за один и более технологических переходов с дискретным изменением (уменьшением) скорости радиальной подачи [6]. Следовательно,

## Машинобудування і зварювальне виробництво

создавая определенный натяг в технологической системе и отключая радиальную подачу, можно обеспечить заданную точность обрабатываемой поверхности за наименьшее основное время обработки  $\tau$ . С физической точки зрения эффект от применения выхаживания обусловлен выполнением в течении всего времени обработки условия равенства радиальной составляющей силы резания  $P_y$  и упруго-восстанавливающей силы  $c \cdot u$  благодаря осуществлению упругой схемы шлифования.

### ВЫВОДЫ

В работе определены условия уменьшения основного времени обработки на операции круглого врезного шлифования с учетом ограничения по точности обрабатываемой поверхности детали, определяемой упругими перемещениями, возникающими в технологической системе, за счет увеличения количества технологических переходов. Теоретически показано, что существует экстремум (минимум) основного времени обработки в зависимости от величины упругого перемещения на каждом из технологических переходов. На этой основе получены аналитические зависимости для определения скорости радиальной подачи на каждом технологическом переходе. Расчетами установлено, что с увеличением количества технологических переходов минимум основного времени обработки уменьшается, однако не столь существенно. Наибольший эффект достигается при осуществлении операции круглого врезного шлифования в два технологических перехода, включающей предварительное и окончательное шлифование.

Показано, что при съеме относительно больших припусков целесообразно операцию круглого врезного шлифования производить в три и более переходов с целью уменьшения основного времени обработки. Проведено сравнение основного времени обработки при осуществлении операции круглого врезного шлифования с дискретным и непрерывным (в условиях выхаживания) уменьшением во времени скорости радиальной подачи. Установлено, что при выхаживании при заданной точности обрабатываемой поверхности основное время обработки значительно меньше, чем при дискретном уменьшении во времени скорости радиальной подачи. Это указывает на эффективность применения схемы выхаживания при шлифовании для обеспечения высокой точности обрабатываемой поверхности и снижения основного времени обработки, в том числе и при съеме увеличенных припусков.

### Список использованных источников:

1. Балакишин, Б. С. Основы технологии машиностроения / Б. С. Балакишин. – М. : Машиностроение, 1969. – 359 с.
2. Лурье, Г. Б. Шлифование металлов / Г. Б. Лурье. – М. : Машиностроение, 1969. – 197 с.
3. Маталин А. А. Технология машиностроения: учебник / А. А. Маталин. – Л.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
4. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения. В 10 т. Т. 1. Механика резания материалов / под общ. ред. Ф. В. Новикова, А. В. Якимова. – Одесса: ОНПУ, 2002. – 580 с.
5. Новіков, Ф. В. Теорія високоякісної обробки деталей машин : монографія / Ф. В. Новіков. – Харків : Вид-во ХНЕУ, 2013. – 390 с.

6. Ковальчук А. Н. Оптимизация структуры и параметров операций шлифования ответственных валов приводов шахтных конвейеров : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / Ковальчук А. Н. – Одесса, 2008. – 21 с.

Полянський В. І.

## ТЕХНОЛОГІЧНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ТА ПРОДУКТИВНОСТІ ОБРОБКИ ПРИ ШЛІФУВАННІ

*В роботі визначено умови зменшення основного часу обробки на операції круглого врізного шліфування з урахуванням обмеження за точністю оброблюваної поверхні деталі, яка визначається пружними переміщеннями, що виникають в технологічній системі, за рахунок збільшення кількості технологічних переходів. Теоретично показано, що існує екстремум (мінімум) основного часу обробки залежно від величини пружного переміщення, що виникає в технологічній системі, на кожному з технологічних переходів. Основний час обробки при цьому на кожному з технологічних переходів шліфування однаковий, незважаючи на відмінність пружних переміщень, що обумовлено дискретним зменшенням швидкості радіальної подачі на кожному наступному технологічному переході. На цій основі отримано аналітичні залежності для визначення швидкості радіальної подачі на кожному технологічному переході. Розрахунками встановлено, що зі збільшенням кількості технологічних переходів мінімум основного часу обробки зменшується, однак не настільки істотно. Найбільший ефект в цьому напрямку досягається при здійсненні операції круглого врізного шліфування в два переходи, чим пояснюється ефективність застосування на практиці операції круглого врізного шліфування, що включає попереднє та кінцеве шліфування. Це свідчить про достовірність розробленої в роботі математичної моделі.*

*Показано, що при зніманні відносно великих припусків доцільно операцію круглого врізного шліфування здійснювати в три й більше переходів з метою зменшення основного часу обробки. Проведено порівняння основного часу обробки при здійсненні операції круглого врізного шліфування з дискретним і безперервним (при виходжуванні) зменшенням в часі швидкості радіальної подачі. Встановлено, що при виходжуванні при заданій точності оброблюваної поверхні основний час обробки значно менше, ніж при дискретно зменшуваний в часі швидкості радіальної подачі. Це вказує на ефективність застосування схеми виходжування при шліфуванні для забезпечення високої точності оброблюваної поверхні та зниження основного часу обробки, в тому числі й при зніманні збільшених припусків.*

**Ключові слова:** *кругле врізне шліфування, технологічні переходи, основний час обробки, пружне переміщення, швидкість радіальної подачі, виходжування.*

Polyanskiy V. I.

## TECHNOLOGICAL LAWS TO IMPROVE THE ACCURACY AND PRODUCTIVITY OF PROCESSING DURING GRINDING

*The work defines the conditions for reducing the main processing time for round-cut grinding operations, taking into account the limitation on the accuracy of the workpiece surface, determined by the elastic displacements occurring in the technological system, by increasing the number of technological transitions. It is theoretically shown that there is an extremum (minimum) of the main processing time depending on the magnitude of the elastic displacement that occurs in the technological system at each of the technological transitions. The main processing time is the same*

Режим доступу: <http://sap.pstu.edu>

## Машинобудування і зварювальне виробництво

for each of the technological grinding transitions, despite the difference in elastic displacements, which is caused by a discrete decrease in the speed of the radial feed at each subsequent technological transition. On this basis, obtained analytical dependencies to determine the speed of the radial feed at each technological transition. The calculations found that with an increase in the number of technological transitions, the minimum of the main processing time decreases, but not so significantly. The greatest effect in this direction is achieved in the implementation of the operation of the circular mortise grinding in two transitions, which explains the effectiveness in practical use of the operation of the circular mortise grinding, including preliminary and final grinding. This indicates the reliability of the mathematical model developed in the paper.

It is shown that when removing relatively large allowances, it is advisable to carry out the operation of round plunge grinding in three or more transitions in order to reduce the main processing time. A comparison was made of the main processing time when performing the operation of a circular mortise grinding with discrete and continuous (when nursing) decrease in time of the radial feed rate. It has been established that with nursing with a given accuracy of the surface being treated, the main processing time is much less than with a discrete decrease in time of the radial flow rate. This indicates the effectiveness of the application of the nursing pattern when grinding to ensure high precision of the treated surface and reduce the main processing time, including the removal of increased allowances.

**Keywords:** circular plunge grinding, technological transitions, the main processing time, elastic movement, radial feed speed, nursing.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Андилахай А. А.

Статья поступила 10.01.2019 г.

УДК 621.74:621.316.933

Лоза А. В., Рассохин Д. А., Ткачук Е. В., Шишкин В. В.

### ПРИМЕНЕНИЕ РАЗРЯДНИКОВ НАПРЯЖЕНИЙ В ОСНОВНЫХ УЗЛАХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ МНЛЗ

В работе на основе анализа условий работы оборудования МНЛЗ и особенностей образования дефектов предложен способ уменьшения трещинообразования с использованием разрядников напряжений. Рассмотрена усовершенствованная конструкция головки затравки, разработанная на основе анализа ее напряженного состояния. Предложенные конструкции затравок позволяют уменьшить процесс трещинообразования в них и увеличить срок их эксплуатации.

**Ключевые слова:** машины непрерывного литья заготовок, затравка, напряжения, трещины, дефекты, разрядники напряжений, моделирование.

**Постановка проблемы.** В промышленном оборудовании наличие трещин и других поверхностных дефектов является недопустимым при эксплуатации. Особенно важным это условие является для деталей, являющихся составной частью большого комплекса оборудования. Например, в машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) с общей массой оборудования в несколько тысяч тонн выход из строя даже одной детали влечет за собой очень серьезные последствия. Потери производства от незапланированных простоев связаны с миллионными убытками. В то же время в общей массе оборудования МНЛЗ имеются узлы, работающие в условиях, близких к критическим, что обуславливает их быстрое разрушение и может привести к аварийным остановкам. Для таких тяжело нагруженных узлов

Режим доступа: <http://sap.pstu.edu>