

**НОВИКОВ Ф. В.**

## **ЗАКОНОМЕРНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ УПРУГИМИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯМИ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ПРИ ШЛИФОВАНИИ**

Предложен теоретический подход к определению упругими перемещениями, возникающими в технологической системе при шлифовании. Получены аналитические зависимости для определения упругих перемещений, возникающих на переходах шлифования и выхаживания. Это позволило определить основное время обработки, необходимое для достижения заданного значения точности обработки. Установлено, что наименьшее основное время обработки при заданной точности обработки достигается при условии съема всего припуска лишь по схеме выхаживания, исключая переход чистового шлифования. При этом в технологической системе необходимо создать начальный натяг, равный или кратный величине снимаемого припуска. Эффект данной схемы обработки состоит в обеспечении максимально возможной производительности для заданной точности обработки. Основными ограничениями применения данной схемы являются обеспечение высокой режущей способности шлифовального круга и создание увеличенного начального натяга в технологической системе. Поэтому в данных условиях на практике следует основную часть припуска удалять по жесткой схеме с заданной радиальной или продольной подачей инструмента, а оставшуюся небольшую часть припуска – по рассматриваемой схеме выхаживания. Установлено, что при обработке по данной схеме наибольшее влияние на основное время обработки оказывает степень затупления режущих зерен круга. С увеличением остроты режущих зерен круга основное время обработки уменьшается, обеспечивая заданную точность обработки с большей производительностью. Следовательно, при обеспечении высокой режущей способности шлифовального круга можно удалять значительные припуски по данной схеме выхаживания, исключая переход шлифования и увеличивая производительность при обеспечении заданной точности обработки.

**Ключевые слова:** точность и качество обработки, производительность обработки, основное время обработки, выхаживание, начальный натяг, шлифовальный круг.

**НОВИКОВ Ф. В.**

## **ЗАКОНОМІРНОСТІ УПРАВЛІННЯ ПРУЖНИМИ ПЕРЕМІЩЕННЯМИ В ТЕХНОЛОГІЧНІЙ СИСТЕМІ ПРИ ШЛІФУВАННІ**

Запропоновано теоретичний підхід до визначення пружних переміщень, що виникають в технологічній системі при шліфуванні. Отримано аналітичні залежності для визначення пружних переміщень, що виникають на переходах шліфування і виходжування. Це дозволило визначити основний час обробки, необхідний для досягнення заданого значення точності обробки. Встановлено, що найменший основний час обробки при заданій точності обробки досягається за умови знімання всього припуску лише за схемою виходжування, виключаючи перехід чистового шліфування. При цьому в технологічній системі необхідно створити початковий натяг, рівний або кратний величині припуску, що знімається. Ефект даної схеми обробки полягає в забезпеченні максимально можливої продуктивності для заданої точності обробки. Основними обмеженнями застосування даної схеми є забезпечення високої ріжучої здатності шліфувального круга і створення збільшеного початкового натягу в технологічній системі. Тому в даних умовах на практиці слід основну частину припуску видаляти за жорсткою схемою із заданою радіальною або поздовжньою подачею інструменту, а решту – невелику частину припуску - за розглянутою схемою виходжування. Встановлено, що при обробці за даною схемою найбільше впливає на основний час обробки ступінь затуплення ріжучих зерен круга. Зі збільшенням гостроти ріжучих зерен круга основний час обробки зменшується, забезпечуючи задану точність обробки з більшою продуктивністю. Отже, при забезпеченні високої ріжучої здатності шліфувального круга можна видаляти значні припуски за даною схемою виходжування, виключаючи перехід шліфування і збільшуючи продуктивність при забезпеченні заданої точності обробки.

**Ключові слова:** точність та якість обробки, продуктивність обробки, основний час обробки, виходжування, початковий натяг, шліфувальний круг.

**NOVIKOV F. V.**

## **REGULARITIES OF MANAGEMENT OF ELASTIC MOVEMENTS IN THE TECHNOLOGICAL SYSTEM AT GRINDING**

A theoretical approach to determining the elastic displacements that occur in a technological system during grinding is proposed. Analytical dependences are obtained for determining the elastic displacements arising at the transitions of grinding and nursing. This made it possible to determine the main processing time necessary to achieve the required value of processing accuracy. It has been established that the smallest main processing time for a given processing accuracy is achieved provided that the entire allowance is removed only according to the nursing scheme, excluding the transition to finish grinding. In this case, in the technological system it is necessary to create an initial interference equal to or a multiple of the size of the removed allowance. The effect of this processing scheme is to provide the highest possible productivity for a given processing accuracy. The main limitations of the application of this scheme are to ensure high cutting ability of the grinding wheel and the creation of an increased initial interference in the technological system. Therefore, in these conditions, in practice, the main part of the allowance should be removed according to a rigid scheme with a given radial or longitudinal feed of the tool, and the remaining small part of the allowance should be removed according to the nursing scheme under consideration. It was established that during processing according to this scheme, the degree of bluntness of the cutting grains of a circle has the greatest influence on the main processing time. With an increase in the sharpness of the cutting grains of the circle, the main processing time decreases, providing a given processing accuracy with greater productivity. Therefore, while ensuring a high cutting ability of the grinding wheel, it is possible to remove significant allowances according to this nursing scheme, eliminating the grinding transition and increasing productivity while ensuring a given machining accuracy.

**Keywords:** accuracy and quality of processing, processing productivity, main processing time, nursing, initial tightness, grinding wheel.

**1. Введение.** Параметры точности и качества обработки при шлифовании во многом зависят от упругих перемещений, возникающих в технологической системе. Это связано в первую очередь с высокой силовой напряженностью процесса шлифования, обусловленной интенсивным трением связки шлифовального круга с обрабатываемым материалом. В результате энергоёмкость обработки при шлифовании больше, чем при лезвийной обработке, что является причиной возникновения температурных дефектов на обрабатываемой поверхности, т.е. ухудшения каче-

ства обработки, а также снижения точности обработки. Как показывает практика, уменьшить упругие перемещения при шлифовании можно увеличением жесткости технологической системы станка и снижением энергоёмкости обработки за счет повышения режущей способности шлифовального круга. Важным направлением также следует рассматривать управление упругими перемещениями путем создания начального натяга в технологической системе. В связи с этим в работе решается актуальная задача определения закономерностей формирования упругих пе-

ремещений в технологической системе при шлифовании и условий их уменьшения за счет создания начального натяга.

## 2. Анализ последних исследований и публикаций.

В работах [1-3] определены основные направления повышения точности обработки при шлифовании за счет управления упругими перемещениями в технологической системе. В работе [4] приведено аналитическое решение об условиях возникновения упругих перемещений при шлифовании, полученное с применением экспериментальных данных силы резания, что не позволило в обобщенном виде установить оптимальные параметры шлифовании по критерию точности обработки. Поэтому поставлена задача: получить теоретическое решение определения упругих перемещений при шлифовании с учетом аналитического представления силы резания. Такой подход позволит по-новому подойти к определению основного времени обработки, оптимальных параметров шлифовании по критерию наибольшей производительности с учетом ограничения по точности обработки.

**3. Цель исследования.** Теоретическое обоснование основных направлений уменьшения упругих перемещений, возникающих в технологической системе при шлифовании, и повышение точности, качества и производительности обработки.

## 4. Изложение основного материала.

Предположим, под действием радиальной составляющей силы резания  $P_y$  в технологической системе возникают упругие перемещения  $y$ . Уравнение баланса перемещений  $y$  в процессе шлифовании прямолинейного образца, движущегося по нормали к рабочей поверхности круга с номинальной скоростью  $V'_{дем}$  (рис. 1), имеет вид

$$y = V'_{дем} \cdot \tau - \int \bar{V}'_{дем} \cdot d\tau, \quad (1)$$

где  $\tau$  – время обработки, с;  $\bar{V}'_{дем}$  – фактическая скорость движения образца, м/с ( $\bar{V}'_{дем} \leq V'_{дем}$ ).

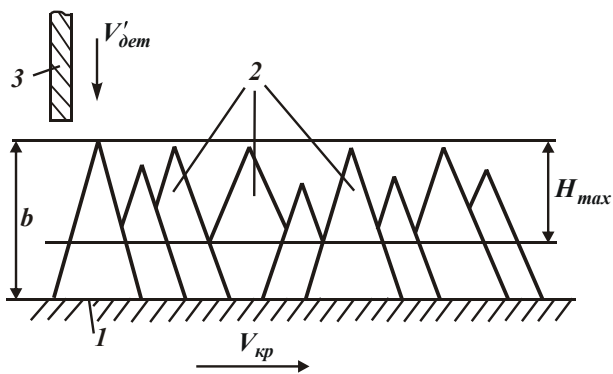


Рис. 1 – Расчетные схемы шлифовании: 1 – связка круга; 2 – режущие зерна; 3 – обрабатываемый образец; 4 – изношенная часть зерна ( $V_{кр}$  – скорость круга, м/с;  $b$  – максимальная высота выступания режущих зерен на уровне связки шлифовального круга, м;  $H_{max}$  – максимальная толщина среза зернами круга, м)

При работе круга в режиме самозатачивания процесс шлифовании стабилизируется во времени и

величина  $y$  принимает постоянное значение. Фактический съем материала, определяемый вторым слагаемым в зависимости (1), меньше номинального съема материала, устанавливаемого по лимбу станка и определяемого первым слагаемым. При работе круга в режиме затупления величина  $y$  переменна во времени (непрерывно увеличивается). Это обусловлено более интенсивным увеличением первого слагаемого.

Установим из уравнения (1) скорость  $\bar{V}'_{дем}$  как функцию от времени шлифовании с учетом  $P_y = c \cdot y$ , где  $c$  – жесткость технологической системы, Н/м.

Радиальная составляющая силы резания  $P_y$  определяется из зависимости:

$$P_y = \frac{P_z}{K_{ш}} = \frac{\sigma \cdot S_{мгн}}{K_{ш}}, \quad (2)$$

где  $P_z$  – тангенциальная составляющая силы резания, Н;  $\sigma$  – условное напряжение резания, Н/м<sup>2</sup>;  $K_{ш} = P_z / P_y$  – коэффициент шлифовании;  $S_{мгн}$  – суммарная площадь среза всеми одновременно работающими зернами круга, м<sup>2</sup>.

В работе [5] приведены аналитические зависимости для определения параметров шлифовании:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\pi \cdot \text{tg} \gamma \cdot HV \cdot \sigma_{сж}}{1 - \eta}}, \quad (3)$$

$$K_{ш} = 2 \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{сж} \cdot (1 - \eta)}{\pi \cdot \text{tg} \gamma \cdot HV}}, \quad (4)$$

$$S_{мгн} = \frac{F \cdot \bar{V}'_{дем}}{V_{кр}}, \quad (5)$$

где  $HV$ ,  $\sigma_{сж}$  – соответственно твердость по Виккерсу и предел прочности на сжатие обрабатываемого материала, Н/м<sup>2</sup>;  $2\gamma$  – угол при вершине режущего конусообразного зерна;  $\eta$  – безразмерный коэффициент, определяющий степень затупления режущего зерна, 0...1,0 ( $\eta \rightarrow 0$  – для острого зерна,  $\eta \rightarrow 1$  – для затупленного зерна);  $F$  – площадь контакта шлифовального круга с обрабатываемым образцом, м<sup>2</sup>;  $V_{кр}$  – скорость круга, м/с.

Подставляя зависимости (3) – (5) в (2), имеем:

$$P_y = \frac{\pi \cdot \text{tg} \gamma \cdot HV \cdot F \cdot \bar{V}'_{дем}}{2 \cdot (1 - \eta) \cdot V_{кр}}. \quad (6)$$

После подстановки зависимости (6) в интегральное уравнение (1) и его дифференцирования по времени  $\tau$ , получено дифференциальное уравнение:

$$\frac{d\bar{V}'_{дем}}{d\tau} = \frac{1}{\alpha_3} \cdot (V'_{дем} - \bar{V}'_{дем}), \quad (7)$$

где  $\alpha_3 = \frac{\pi \cdot \text{tg} \gamma \cdot HV \cdot F}{2 \cdot c \cdot (1 - \eta) \cdot V_{кр}}$ .

Решая дифференциальное уравнение (7) методом разделения переменных и принимая в первом приближении  $(1 - \eta)$  постоянной величиной, т.е. не учитывая износ зерен круга во времени, получено

$$\frac{d\bar{V}'_{dem}}{(\bar{V}'_{dem} - V'_{dem})} = \frac{d\tau}{\alpha_3}, \quad (8)$$

откуда  $\ln(\bar{V}'_{dem} - V'_{dem}) = -\frac{\tau}{\alpha_3} + C_0$  или

$$\bar{V}'_{dem} = V'_{dem} - C_1 \cdot e^{-\frac{\tau}{\alpha_3}}. \quad (9)$$

Постоянная интегрирования  $C_1$  определяется из начального условия обработки, например, из условия  $\bar{V}'_{dem}(\tau = 0) = 0$ . Тогда  $C_1 = V'_{dem}$  и решение дифференциального уравнения (9) принимает вид:

$$\bar{V}'_{dem} = V'_{dem} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\tau}{\alpha_3}}\right). \quad (10)$$

Из зависимости (10) следует, что с течением времени обработки  $\tau$  фактическая скорость движения обрабатываемого образца (или фактическая скорость съема материала)  $\bar{V}'_{dem}$  увеличивается, неограниченно приближаясь к номинальной скорости движения образца (или номинальной скорости съема материала)  $V'_{dem}$  (рис. 2). Подставляя зависимость (10) в уравнение (1), определено упругое перемещение  $y$ :

$$y = -V'_{dem} \cdot \alpha_3 \cdot e^{-\frac{\tau}{\alpha_3}} + C_2. \quad (11)$$

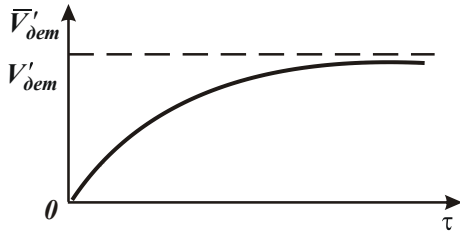


Рис. 2 – Зависимость  $\bar{V}'_{dem}$  от  $\tau$

Постоянная интегрирования  $C_2$  определяется из начального условия  $y(\tau = 0) = 0$ . Тогда  $C_2 = V'_{dem} \cdot \alpha_3$  и зависимость (11) описывается:

$$y = V'_{dem} \cdot \alpha_3 \cdot \left(1 - e^{-\frac{\tau}{\alpha_3}}\right). \quad (12)$$

Характер изменения величины  $y$  во времени такой же, как и параметра  $\bar{V}'_{dem}$  (рис. 2). Согласно зависимости (6), произведение  $V'_{dem} \cdot \alpha_3$  определяет значение  $y = y_0$  при скорости  $V'_{dem}$ . Тогда зависимость (12) можно представить в виде:

$$y = y_0 \cdot \left(1 - e^{-\frac{\tau}{\alpha_3}}\right). \quad (13)$$

При условии  $\tau \rightarrow \infty$  значение  $y \rightarrow y_0$ , т. е. увеличивается, что снижает точность обработки.

При условии создания начального натяга в технологической системе, т. е. при начальных условиях:

$$\begin{cases} \bar{V}'_{dem}(\tau = 0) = V_1; \\ y(\tau = 0) = y_1 \end{cases} \quad (14)$$

решение дифференциального уравнения (8) принимает вид:

$$\bar{V}'_{dem} = V'_{dem} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\tau}{\alpha_3}}\right) + V_1 \cdot e^{-\frac{\tau}{\alpha_3}}, \quad (15)$$

$$y = y_1 - (V_1 - V'_{dem}) \cdot \alpha_3 \cdot \left(1 - e^{-\frac{\tau}{\alpha_3}}\right). \quad (16)$$

С учетом зависимости (6) и  $y_1 = \alpha_3 \cdot V_1$ , имеем:

$$y = y_1 \cdot e^{-\frac{\tau}{\alpha_3}} + V'_{dem} \cdot \alpha_3 \cdot \left(1 - e^{-\frac{\tau}{\alpha_3}}\right). \quad (17)$$

Первое слагаемое определяет упругое перемещение на переходе выхаживания, а второе слагаемое – на переходе чистового шлифования. Как видно, слагаемые, входящие в зависимость (17), оказывают противоположное влияние на характер изменения величины упругого перемещения  $y$  во времени. Уменьшить величину  $y$  и тем самым повысить точность обработки можно исключением второго слагаемого из зависимости (17). Это выполняется при  $V'_{dem} = 0$ , т. е. при шлифовании без подачи с начальным радиальным перемещением  $y_1$ . В этом случае основное время обработки определяется лишь временем перехода выхаживания.

На практике данная схема обработки применяется при съеме относительно небольших припусков на доводочных операциях. В действительности, возможности этой схемы значительно шире и она может быть использована при съеме больших припусков, оставляемых при предварительной лезвийной и окончательной абразивной обработке [6].

Эффект схемы состоит в обеспечении максимально возможной производительности для заданной точности обработки. Основными ограничениями применения схемы являются обеспечение высокой режущей способности шлифовального круга и создание начального натяга в технологической системе, равного величине снимаемого припуска, который может достигать больших значений – 1...2 мм и более. В этих условиях на практике принято основную часть припуска удалять по жесткой схеме с заданной радиальной или продольной подачей инструмента и лишь небольшую часть припуска – по рассматриваемой схеме (с начальным радиальным перемещением  $y_1$ ). При обеспечении высокой режущей способности шлифовального круга можно удалять значительные припуски по данной схеме выхаживания, исключая переход шлифования и увеличивая производительность при обеспечении заданной точности обработки.

Обработка по жесткой схеме описывается вторым слагаемым в зависимости (17). Ее применение ведет к увеличению величины  $y$  (снижению точности обработки). Следовательно, применяемые на практике схемы обработки лезвийными и абразивными

ми инструментами с точки зрения обеспечения точности обработки являются малопродуктивными. Необходимо использовать схему обработки без подачи с начальным радиальным перемещением, уменьшая припуски под обработку и ограничиваясь финишными операциями с применением абразивных и лезвийных инструментов.

По сути, применяемые на практике процессы резания по жесткой схеме являются вынужденной мерой в связи с необходимостью съема относительно больших припусков и сложностью обеспечения высокой режущей способности инструмента.

При абразивной обработке без подачи с начальным радиальным перемещением (т.е. при выхаживании) выполняется условие  $V'_{\text{дем}}=0$ . В результате зависимости (15) и (17) принимают вид:

$$\bar{V}'_{\text{дем}} = V_1 \cdot e^{-\frac{\tau}{\alpha_3}} = \frac{y_1}{\alpha_3} \cdot e^{-\frac{\tau}{\alpha_3}}, \quad (18)$$

$$y = y_1 \cdot e^{-\frac{\tau}{\alpha_3}}. \quad (19)$$

Фактическая скорость съема материала  $V'_{\text{дем}}$  и упругое перемещение  $y$  с течением времени обработки  $\tau$  непрерывно уменьшаются. Начальные значения  $\bar{V}'_{\text{дем}}$  и  $y$  определяются значением радиального перемещения  $y_1$ . Чем больше  $y_1$ , тем больше параметры  $\bar{V}'_{\text{дем}}$  и  $y$ . Интенсивность уменьшения параметров  $\bar{V}'_{\text{дем}}$  и  $y$  с течением времени зависит от параметра  $\alpha_3$ .

Полученные решения справедливы при условии постоянства во времени безразмерного коэффициента  $\eta$ , определяющего степень затупления режущих зерен. В действительности, с течением времени обработки коэффициент  $\eta$  увеличивается в связи с износом зерен. Это приводит к более сложному решению дифференциального уравнения (8). Однако в первом приближении можно принять решение в виде зависимости (10), согласно которой с увеличением коэффициента  $\eta$  фактическая скорость движения обрабатываемого образца  $\bar{V}'_{\text{дем}}$  с течением времени будет увеличиваться менее интенсивно. Это снизит эффективность применения схемы выхаживания с начальным натягом в технологической системе.

**Выводы.** В работе получены аналитические зависимости для определения упругих перемещений, возникающих в технологической системе при шлифовании. Это позволило определить основное время обработки на переходах шлифования и выхаживания. Показано, что наименьшее основное время обработки при заданной точности обработки достигается при условии полного съема припуска лишь по схеме вы-

хаживания, создавая начальный натяг в технологической системе. Установлено, что в этом случае наибольшее влияние на основное время обработки оказывает степень затупления режущих зерен круга. С увеличением режущей способности круга основное время обработки уменьшается, появляется возможность увеличения начального натяга в технологической системе с одновременным обеспечением увеличения производительности обработки при достижении заданной точности.

#### Список литературы:

1. Лурье Г. Б. *Шлифование металлов* / Г. Б. Лурье. – М.: Машиностроение, 1969. – 197 с.
2. Колев К. С. *Точность обработки и режимы резания* / К. С. Колев, Л. М. Горчаков. – М.: Машиностроение, 1976. – 144 с.
3. Новоселов Ю. К. *Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке* / Ю. К. Новоселов. – Саратов, 1979. – 232 с.
4. Тверской М. М. *Автоматическое управление режимами обработки деталей на станках* / М. М. Тверской. – М.: Машиностроение, 1982. – 208 с.
5. *Теоретические основы резания и шлифования материалов*: учеб. пособие / А. В. Якимов, Ф. В. Новиков, Г. В. Новиков, Б. С. Серов, А. А. Якимов. – Одесса: ОГПУ, 1999. – 450 с.
6. Полянский В. И. *Теоретическое обоснование условий высокоточной и высокопроизводительной механической обработки деталей машин* / В. И. Полянский // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії: зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків: НТУ «ХПІ», 2019. – № 11 (1336), 2019. – С. 65–69.

#### References (transliterated)

1. Lur'ye G. B. *Progressivnyye metody kruglogo naruzhnogo shlifovaniya* [Progressive methods of circular external grinding]. – Leninograd, Mashinostroyeniye. 103 s. (1984).
2. Kolev K. S., Gorchakov L. M. *Tochnost' obrabotki i rezhimy rezaniya* [Precision of processing and cutting conditions]. – Moskva, Mashinostroyeniye. 144 s. (1976).
3. Novoselov YU. K. *Dinamika formoobrazovaniya poverkhnostey pri abrazivnoy obrabotke* [Dynamics of surface formation during abrasive processing]. – Saratov. 232 s. (1979).
4. Tverskoy M. M. *Avtomaticheskoye upravleniye rezhimami obrabotki detaley na stankakh* [Automatic control of the modes of processing parts on machines]. – Moskva, Mashinostroyeniye. 208 s. (1982).
5. Yakimov A. V., Novikov F. V., Novikov G. V., Serov B. S., Yakimov A. A. *Teoreticheskiye osnovy rezaniya i shlifovaniya materialov* [Theoretical foundations of cutting and grinding of materials]: ucheb. posobiye. – Odessa, OGPU. 450 s. (1999).
6. Polyanskiy V. I. *Teoreticheskoye obosnovaniye usloviy vysokotochnoy i vysokoproizvoditel'noy mekhanicheskoy obrabotki detaley mashin* [Theoretical substantiation of the conditions of high-precision and high-performance machining of machine parts] // *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu «KHPI»*. Seriya: *Innovatsiyini tekhnolohiyi ta obladnannya obrobky materialiv u mashynobuduvanni ta metalurhiyi* [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy]: zb. nauk. pr. / Natsional'nyu tekhnichnyu universytet «Kharkiv politekhn. in-t». Kharkiv, NTU «KHPI». 11 (1336). 65–69 (2019).

Поступила (received) 15.05.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Новіков Федір Васильович (Новиков Федор Васильевич, Novikov Fedir Vasilivych)** – доктор технічних наук, професор кафедри "Природоохоронні технології, екологія та безпека життєдіяльності" Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця, м. Харків; тел.: (0572) 69-55-62; e-mail: [novikovfv@i.ua](mailto:novikovfv@i.ua) ORCID: 0000-0001-6996-3356