

УДК 621.923

**Ф. В. НОВИКОВ**, д-р техн. наук,  
**И. А. РЯБЕНКОВ**, канд. техн. наук,  
**Ю. Г. ГУЦАЛЕНКО**, Харьков, Украина

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

В роботі наведено спрощене аналітичне рішення визначення пружного переміщення, що виникає в технологічній системі, при шліфуванні та обґрунтовано умови його зменшення з метою підвищення точності обробки. Доведено можливість підвищення точності та продуктивності обробки при шліфуванні за рахунок створення в технологічній системі початкового натягу, рівного сталому значенню пружного переміщення, й здійснення процесу шліфування за схемою виходжування.

**Ключові слова:** шліфування, точність обробки, продуктивність обробки, пружне переміщення, технологічна система, початковий натяг, схема виходжування

В работе приведено упрощенное аналитическое решение определения упругого перемещения, возникающего в технологической системе, при шлифовании и обоснованы условия его уменьшения с целью повышения точности обработки. Доказана возможность повышения точности и производительности обработки при шлифовании за счет создания в технологической системе начального натяга, равного установившемуся значению упругого перемещения, и осуществления процесса шлифования по схеме выхаживания.

**Ключевые слова:** шлифование, точность обработки, производительность обработки, упругое перемещение, технологическая система, начальный натяг, схема выхаживания

The paper presents a simplified analytical solution to determine the elastic displacement that occurs in the technological system during grinding and justifies the conditions for its reduction in order to improve the accuracy of processing. The possibility of increasing the accuracy and productivity of machining during grinding is proved by the creation in the technological system of an initial tightness equal to the steady value of the elastic displacement and the process of grinding according to the scheme of grooming.

**Keywords:** grinding, precision of processing, processing capacity, elastic displacement, technological system, initial tension, woofers scheme

**Постановка проблеми.** Метод шліфування забезпечує високі показателі точності і шерохватості оброблюваних поверхностей за счет здійснення тончайших мікрорезів абразивними зернами і зменшення сили різання. Однак виникаючі в процесі різання в технологічній системі епругі переміщення не дозволяють в повній мірі реалізувати потенціальні можливості цього прогресивного методу фінішної механічної обробки, що в кінцевому ітоге приводить к зниженню точності і продуктивності обробки. Поэтому знання закономірностей управління епругі переміщеннями в технологічній системі при

шлифовании имеет большое теоретическое и практическое значение с точки зрения повышения точности и производительности обработки, особенно в условиях шлифования с недостаточно жесткой технологической системой. С учетом сказанного, в работе решается задача обоснования условий повышения эффективности процесса шлифования на основе управления упругими перемещениями, возникающими в технологической системе.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В работах [1–4] показано, что упругие перемещения, возникающие в технологической системе, обусловлены главным образом интенсивным трением связи круга с обрабатываемым материалом, поскольку доля энергии трения в общем энергетическом балансе процессе шлифования значительно превышает долю энергии резания абразивными зернами. С этим связана в большинстве случаев шлифования проблема достижения требуемых высоких показателей точности обработки. С целью снижения отрицательного влияния упругих перемещений на точность обработки предложено использовать высокопроизводительные циклы шлифования [4], основанные на управлении упругими перемещениями в процессе шлифования, а также производить оптимизацию параметров режима шлифования по критерию точности обработки [5]. Однако для эффективного решения задачи точности обработки необходимо располагать математическими моделями определения упругих перемещений, возникающих в технологической системе, при шлифовании, поскольку известные в научно-технической литературе решения основаны на результатах экспериментальных исследований.

**3. Цель исследования.** Теоретическое определение условий повышения точности обработки при шлифовании на основе управления упругими перемещениями, возникающими в технологической системе.

**4. Теоретический анализ параметров плоского шлифования с учетом упругих перемещений, возникающих в технологической системе.**

Как известно [5], величина упругого перемещения  $U$  при плоском многопроходном шлифовании по жесткой схеме определяется радиальной составляющей силы резания  $P_y = P_z / K_{рез}$ , которая уравнивается упруго-

восстанавливающей силой  $P_y = c \cdot y = c \cdot (t \cdot n - t_\phi \cdot n)$ , возникающей в технологической системе, где  $P_z = \sigma \cdot \frac{Q}{V_{кр}} = \sigma \cdot \frac{B \cdot V_{дет} \cdot t_\phi}{V_{кр}}$  – тангенциальная

составляющая силы резания, Н;  $K_{рез}$  – коэффициент резания;  $\sigma$  – условное напряжение резания, Н/м<sup>2</sup>;  $Q = B \cdot V_{дет} \cdot t_\phi$  – фактическая производительность обработки, м<sup>3</sup>/с;  $B$  – ширина шлифования, м;  $V_{дет}$ ,  $V_{кр}$  – скорости детали и круга, м/с;  $t$ ,  $t_\phi$  – номинальная и фактическая глубины шлифования, м;  $c$  – жесткость технологической системы, Н/м;  $n$  – количество проходов круга.

Сравнивая эти две силы, получена упрощенная зависимость для определения фактической глубины шлифования:

$$t_{\phi} = \frac{t}{\left(1 + \frac{\sigma \cdot B \cdot V_{\text{дем}}}{K_{\text{рез}} \cdot c \cdot V_{\text{кр}} \cdot n}\right)}. \quad (1)$$

Как видно, с увеличением количества проходов круга  $n$  фактическая глубина шлифования  $t_{\phi}$  непрерывно увеличивается, асимптотически приближаясь к номинальной глубине шлифования  $t$ . Следовательно, фактическая глубина шлифования  $t_{\phi}$  всегда меньше номинальной глубины шлифования  $t$  и определяется значением второго слагаемого зависимости (1). Увеличить  $t_{\phi}$  можно уменьшением интенсивности силовой нагруженности процесса шлифования, определяемой отношением параметров  $\sigma / K_{\text{рез}}$  за счет снижения трения связки круга с обрабатываемым материалом и повышения режущей способности шлифовального круга. Увеличение жесткости технологической системы  $C$  и уменьшение ширины шлифования  $B$  и отношения  $V_{\text{дем}} / V_{\text{кр}}$  также способствует увеличению фактической глубины шлифования  $t_{\phi} \rightarrow t$ . Поэтому с точки зрения увеличения  $t_{\phi}$  и соответственно фактической производительности обработки  $Q$  отношение  $V_{\text{дем}} / V_{\text{кр}}$  необходимо уменьшать за счет уменьшения скорости детали  $V_{\text{дем}}$  и увеличения скорости круга  $V_{\text{кр}}$ .

По такому же закону изменяется и фактическая производительность обработки:

$$Q = B \cdot V_{\text{дем}} \cdot t_{\phi} = \frac{Q_0}{\left(1 + \frac{\sigma \cdot B \cdot V_{\text{дем}}}{K_{\text{рез}} \cdot c \cdot V_{\text{кр}} \cdot n}\right)}. \quad (2)$$

где  $Q_0 = B \cdot V_{\text{дем}} \cdot t$  – номинальная производительность обработки, м<sup>3</sup>/с.

Отличие значений  $t_{\phi}$  и  $t$ , а также  $Q$  и  $Q_0$  обусловлено возникновением в технологической системе упругого перемещения  $U$ , которое определяется зависимостью:

$$y = (t \cdot n - t_{\phi} \cdot n) = \frac{t \cdot n}{\left(1 + \frac{K_{рез} \cdot c \cdot V_{кр} \cdot n}{\sigma \cdot B \cdot V_{дем}}\right)} = \frac{t}{\left(\frac{1}{n} + \frac{K_{рез} \cdot c \cdot V_{кр}}{\sigma \cdot B \cdot V_{дем}}\right)}. \quad (3)$$

Из зависимости (3) следует, что при условии  $n=0$  величина упругого перемещения равна нулю ( $y=0$ ), а при условии  $n \rightarrow \infty$ , вследствие преобладания в знаменателе зависимости (3) второго слагаемого, величина упругого перемещения  $y$  равна:

$$y = y_{уст} = \frac{\sigma \cdot B \cdot V_{дем} \cdot t}{K_{рез} \cdot c \cdot V_{кр}} = \frac{\sigma \cdot Q_0}{K_{рез} \cdot c \cdot V_{кр}} = \frac{P_{y_{уст}}}{c}, \quad (4)$$

где  $y_{уст}$ ,  $P_{y_{уст}} = \frac{\sigma \cdot Q_0}{K_{рез} \cdot V_{кр}}$  – установившиеся значения величины упругого перемещения  $y$  и радиальной составляющей силы резания  $P_y$ .

Следовательно, с увеличением количества проходов круга  $n$  величина упругого перемещения  $y$  непрерывно увеличивается, асимптотически приближаясь к установившемуся значению  $y_{уст}$ . В этом случае выполняются условия:  $t_{\phi} = t$  и  $Q = Q_0$ . Таким образом показано, что возникновение в технологической системе упругого перемещения  $y$  отрицательно сказывается на фактической производительности обработки  $Q$  – она принимает значения, меньшие номинальной производительности обработки  $Q_0$ . Очевидно, для выполнения условия  $Q = Q_0$  необходимо исключить переходной процесс при шлифовании и на первом проходе круга обеспечить выполнение условия  $y = y_{уст}$ .

Необходимо отметить, что по интенсивности изменения зависимость  $y-n$  отличается от аналогичных зависимостей  $t_{\phi}-n$  и  $Q-n$ , поскольку структуры полученных зависимостей (1), (2) и, соответственно, (3) разные.

Для удобства анализа зависимость (3) с учетом зависимости (4) можно представить в виде:

$$y = \frac{1}{\left(\frac{1}{n \cdot t} + \frac{1}{y_{уст}}\right)} = \frac{y_{уст}}{\left(1 + \frac{y_{уст}}{n \cdot t}\right)}. \quad (5)$$

Из зависимости (5) следует, что при условии  $n=0$  величина упругого перемещения  $y=0$ , а при условии  $n \rightarrow \infty$  соответственно  $y \rightarrow y_{уст}$ .

По такому же закону изменяется и упруго-восстанавливающая сила  $P_y = c \cdot y$ , возникающая в технологической системе, равная радиальной составляющей силы резания:

$$P_y = \frac{c \cdot t \cdot n}{\left(1 + \frac{K_{рез} \cdot c \cdot V_{кр} \cdot n}{\sigma \cdot B \cdot V_{дет}}\right)} = \frac{c \cdot t}{\left(\frac{1}{n} + \frac{K_{рез} \cdot c \cdot V_{кр}}{\sigma \cdot B \cdot V_{дет}}\right)}. \quad (6)$$

Как видно, с увеличением количества проходов круга  $n$  радиальная  $P_y$  составляющая силы резания непрерывно увеличивается, асимптотически приближаясь к установившемуся значению  $P_{y_{уст}} = \frac{\sigma \cdot Q_0}{K_{рез} \cdot V_{кр}}$

(при условии  $n \rightarrow \infty$ ).

**5. Сравнение упрощенной и уточненной зависимостей для определения величины упругого перемещения, возникающего в технологической системе.** Необходимо отметить, что зависимость (5) является упрощенной, поэтому ее целесообразно сопоставить с уточненной зависимостью для определения величины упругого перемещения  $y$ , приведенной в работе [6]:

$$y = y_{уст} \cdot \left[ 1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{t}{y_{уст}}\right)^n} \right]. \quad (7)$$

Для исходных данных:  $t=10$  мкм;  $y_{уст}=40$  мкм зависимости (5) и (7) принимают вид:

$$y = \frac{40}{\left(1 + \frac{4}{n}\right)}; \quad (8)$$

$$y = 40 \cdot \left[ 1 - \frac{1}{1,25^n} \right]. \quad (9)$$

В табл. 1 приведены рассчитанные по зависимостям (8) и (9) значения величины  $y$  от количества проходов круга  $n$ .

Таблица 1 – Расчетные значения величины упругого перемещения  $y$  (в мкм)

$n$	0	1	2	5	10	50	100
Зависимость (8)	0	8	13,3	22,2	28,6	37	39,9
Зависимость (9)	0	8	14,4	26,9	35,7	39,94	–

Как видно, расчеты по зависимости (8) приводят к большим значениям величины упругого перемещения  $y$  и соответственно к более быстрому приближению  $y$  к значению  $y_{уст}$  с увеличением количества проходов круга  $n$ . Однако структурно зависимости (5) и (7) совпадают, т.к. содержат одни и те же параметры –  $t$  и  $y_{уст}$ , причем зависимость (5) представлена в более простом и удобном для анализа виде. Это указывает на целесообразность применения упрощенной зависимости (5) для решения практических задач, что открывает новые технологические возможности поиска наиболее перспективных направлений повышения эффективности шлифования, а также и процессов лезвийной обработки.

Учитывая одинаковый характер изменения величины упругого перемещения  $y$  от количества проходов круга  $n$  в зависимостях (5) и (7), следует рассмотреть возможности математического преобразования зависимости (7) к виду зависимости (5).

Величина  $\left(1 + t / y_{уст}\right)^n$ , входящая в знаменатель зависимости (7), представляет собой биномиальный ряд:

$$(1 + \alpha)^n = 1 + n \cdot \alpha + \frac{n \cdot (n-1)}{1 \cdot 2} \cdot \alpha^2 + \frac{n \cdot (n-1) \cdot (n-2)}{1 \cdot 2 \cdot 3} \cdot \alpha^3 + \dots, \quad (10)$$

где  $\alpha = t / y_{уст} < 1$ .

Для  $n=1$  имеем:  $(1 + \alpha)^1 = 1 + 1 \cdot \alpha$ ;

для  $n=2$  имеем:  $(1 + \alpha)^2 = 1 + 2 \cdot \alpha + \alpha^2$ ;

для  $n=3$  имеем:  $(1+\alpha)^3 = 1+3\cdot\alpha+3\cdot\alpha^2+\alpha^3$ ;

для  $n=4$  имеем:  $(1+\alpha)^4 = 1+4\cdot\alpha+6\cdot\alpha^2+4\cdot\alpha^3+\alpha^4$  и т.д.

Очевидно, при условии  $\alpha < 1$  определяющими в приведенных зависимостях являются первые два слагаемых. Поэтому в первом приближении можно биномиальный ряд рассматривать в виде:  $(1+\alpha)^n = 1+n\cdot\alpha$  или

$$\left(1 + \frac{t}{y_{\text{ycm}}}\right)^n = 1 + n \cdot \frac{t}{y_{\text{ycm}}}. \quad (11)$$

Подставляя выражение (11) в зависимость (7), получено

$$y = \frac{y_{\text{ycm}}}{\left(1 + \frac{y_{\text{ycm}}}{n \cdot t}\right)}. \quad (12)$$

В итоге пришли к зависимости (5). Следовательно, принятые упрощения при определении радиальной составляющей силы резания  $P_y$ , равной упруго-восстанавливающей силе, эквивалентны упрощению биномиального ряда, соответствующему переходу от величины  $\left(1 + t / y_{\text{ycm}}\right)^n$  к величине  $1 + n \cdot t / y_{\text{ycm}}$ . Как показали расчеты (табл. 1), расхождение величин  $\left(1 + t / y_{\text{ycm}}\right)^n$  и  $1 + n \cdot t / y_{\text{ycm}}$  проявляется с увеличением количества проходов круга  $n$ , т.е. при значениях упругого перемещения  $y$ , близких к значению  $y_{\text{ycm}}$ . При условии  $y < y_{\text{ycm}}$  расхождение значений упругого перемещения  $y$ , рассчитанных по зависимостям (8) и (9), незначительно и вполне приемлемо для практических расчетов.

Таким образом, математически обоснована степень расхождения упрощенной и уточненной аналитических зависимостей для определения величины упругого перемещения  $y$ , и доказана возможность практического использования упрощенной зависимости.

Из зависимости (12) следует, что основным путем уменьшения величины упругого перемещения  $y$  и, соответственно, повышения точности обработки является уменьшение установившегося значения величины упругого перемещения  $y_{\text{ycm}}$  [7; 8]. Повысить производительность обработки можно за счет исключения в процессе шлифования переходного процесса, т.е. создания в технологической системе начального натяга, равного величине

$u_{уст}$  , и осуществляя процесс шлифования по схеме выхаживания.

Полученное решение использовано при разработке и внедрении в производство эффективных операций шлифования высокоточных деталей машин и систем, в том числе авиационно-космического назначения.

**Выводы.** В работе обоснованы условия повышения точности и производительности обработки при плоском шлифовании на основе управления упругими перемещениями, возникающими в технологической системе. Установлено, что с увеличением количества проходов круга в условиях многопроходного шлифования величина упругого перемещения, фактическая глубина шлифования, фактическая производительность обработки и радиальная составляющая силы резания непрерывно увеличиваются, асимптотически приближаясь к установившимся (номинальным) значениям. Уменьшить величину упругого перемещения без уменьшения номинальной производительности обработки в этих условиях можно за счет уменьшения условного напряжения резания и увеличения скорости круга и жесткости технологической системы. Это достигается повышением режущей способности шлифовального круга и уменьшением трения связки круга с продуктами обработки, применяя эффективную правку круга. Показано, что основным путем уменьшения величины упругого перемещения и, соответственно, повышения точности обработки является уменьшение установившегося значения упругого перемещения. Установлено также, что повысить производительность обработки при одновременном обеспечении заданной точности обработки можно путем создания в технологической системе начального натяга, равного установившемуся значению упругого перемещения, и осуществляя процесс шлифования по схеме выхаживания. Проведено сравнение упрощенной и уточненной аналитических зависимостей для определения упругих перемещений, возникающих в технологической системе при плоском шлифовании. Математически обоснована степень расхождения этих зависимостей и доказана возможность практического использования упрощенной зависимости для выбора оптимальных условий обработки.

**Список использованных источников:** 1. Маслов Е. Н. Теория шлифования металлов / Е. Н. Маслов. – М.: Машиностроение, 1974. – 319 с. 2. Управление процессом шлифования / А. В. Якимов, А. Н. Паршаков, В. И. Свирицев, В. П. Ларшин. – К.: Техніка, 1983. – 182 с. 3. Новоселов Ю. К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю. К. Новоселов. – Саратов, 1979. – 232 с. 4. Лурье Г. Б. Шлифование металлов / Г. Б. Лурье. – М.: Машиностроение, 1969. – 197 с. 5. Новіков Ф. В. Теоретичні основи механічної обробки високоточних деталей : монографія / Ф. В. Новіков, І. О. Рябенков. – Х. : Вид. ХНЕУ, 2013. – 352 с. 6. Рябенков І. О. Підвищення ефективності фінішної обробки деталей гідроапаратури на основі вибору раціональної структури і параметрів операцій: автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.02.08 "Технологія машинобудування" / І. О. Рябенков. – Одеса, 2009. – 21 с. 7. Новіков Ф. В. Фінішна обробка деталей різанням: монографія / Ф. В. Новіков, І. О. Рябенков. – Харків: ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2016. – 270 с. 8. Новіков Ф. В. Основи підвищення качества и про-изводительности



механической обработки: монография / Ф. В. Новиков, В. А. Жовтобрюх, Г. В. Новиков. – Д.: ЛІРА, 2017. – 452 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. *Maslov Ye. N. Teoriya shlifovaniya metallov / Ye. N. Maslov.* – М.: Mashinostroyeniye, 1974. – 319 s. 2. *Upravleniye protsessom shlifovaniya / A. V. Yakimov, A. N. Parshakov, V. I. Svirshchev, V. P. Larshin.* – К.: Tekhnika, 1983. – 182 s. 3. *Novoselov Yu. K. Dinamika formoobrazovaniya poverkhnostey pri abrazivnoy obrabotke / Yu. K. Novoselov.* – Saratov, 1979. – 232 s. 4. *Lur'ye G. B. Shlifovaniye metallov / G. B. Lur'ye.* – М.: Mashinostroyeniye, 1969. – 197 s. 5. *Novikov F.V. Teoretychni osnovy mekhanichnoyi obrobky vysokotochnykh detaley : monohrafiya / F.V. Novikov, I.O. Ryabenkov.* – Kh. : Vyd. KHNEU, 2013. – 352 s. 6. *Ryabenkov I.O. Pidvyshchennya efektyvnosti finishnoyi obrobky detaley hidroaparatury na osnovi vyboru ratsional'noyi struktury i parametriv operatsiy: avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk : spets. 05.02.08 "Tekhnolohiya mashynobuduvannya"* / I.O. Ryabenkov. – Odesa, 2009. – 21 s. 7. *Novikov F. V. Finishna obrobka detaley rizannyam: monohrafiya / F. V. Novikov, I. O. Ryabenkov.* – Kharkiv: KHNEU im. S. Kuznetsya, 2016. – 270 s. 8. *Novikov F. V. Osnovy povysheniya kachestva i proizvoditel'nosti mekhanicheskoy obrabotki: monografiya / F. V. Novikov, V. A. Zhovtobryukh, G. V. Novikov.* – Д.: ЛІРА, 2017. – 452 s.