

**О.С. КЛЕНОВ**, канд. техн. наук, Фирма “ДиМерус Инженеринг”, Харьков;  
**Ф.В. НОВИКОВ**, докт. техн. наук, ХНЭУ, Харьков

## **ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

Разработана математическая модель определения погрешностей механической обработки с позиции баланса упругих перемещений, возникающих в технологической системе, и рабочих перемещений инструмента в процессе резания. Расчетами установлено, что величина упругого перемещения при шлифовании по жесткой схеме математически описывается биномиальным рядом. Доказано, что существует установившееся значение упругого перемещения, определяемого равенством силы резания и силы упругости. Определены оптимальные параметры обработки при шлифовании.

**Ключевые слова:** механическая обработка, шлифование, инструмент, точность обработки, упругое перемещение, технологическая система, сила резания, глубина шлифования

**Введение.** Обеспечение высоких показателей точности механической обработки деталей машин требует значительных трудозатрат, связанных с необходимостью снижения режимов резания и производительности обработки на финишных операциях. Это связано главным образом с возникновением в технологической системе упругих перемещений, которые в процессе резания вызывают различные погрешности обработки. Поэтому требуется установление оптимальных условий обработки, обеспечивающих заданную точность с максимально возможной производительностью, что предполагает разработку математической модели определения погрешностей механической обработки и оптимизацию параметров процесса резания с учетом возникающих в технологической системе упругих перемещений.

**Анализ последних достижений и литературы.** Вопросу определения упругих перемещений при механической обработке посвящены многочисленные работы [1–3], в которых математически описаны технологические закономерности возникновения упругих перемещений. Однако, расчетные зависимости содержат составляющие силы резания, которые могут быть установлены экспериментально, что снижает эффективность теоретических решений.

В работах [4] показано, что тангенциальную составляющую силы резания при шлифовании можно аналитически выразить произведением энергоемкости

обработки и мгновенной суммарной площади поперечного сечения среза, равной отношению производительности обработки к скорости круга. Это открывает принципиально новые возможности теоретического анализа силы резания при шлифовании и соответственно упругих перемещений, возникающих в технологической системе.

**Цель работы, постановка проблемы.** Целью работы является теоретическое определение условий обеспечения заданной точности обработки и повышения при этом производительности на основе учета упругих перемещений, возникающих в технологической системе. Для достижения поставленной цели необходимо разработать математическую модель определения упругих перемещений в технологической системе и на ее основе провести выбор оптимальных условий обработки по критерию наибольшей производительности с учетом ограничения по точности.

**Материалы исследований.** Величина упругого перемещения, возникающего в технологической системе при механической многопроходной обработке (по жесткой схеме) может быть определена зависимостью [5]:

$$y = n \cdot t_n - \sum_{i=1}^n t_i, \quad (1)$$

где  $n$  – количество проходов инструмента;  $t_n$ ,  $t_i$  – номинальная и фактическая глубины резания, м.

Поскольку фактическая глубина резания является функцией величины упругого перемещения  $y$ , возникающего в технологической системе на каждом проходе инструмента, то целесообразно величину  $y$  выразить через  $t$ :

$$y = \frac{P_y}{c} = \frac{P_z}{K_{рез} \cdot c} = \frac{\sigma \cdot F}{K_{рез} \cdot c}, \quad (2)$$

где  $P_y$ ,  $P_z$  – радиальная и тангенциальная составляющие силы резания, Н;  $c$  – приведенная жесткость технологической системы, Н/м;  $K_{рез} = P_z / P_y$  – коэффициент резания;  $\sigma$  – условное напряжение резания, Н/м<sup>2</sup>;  $F$  – площадь поперечного сечения среза, м<sup>2</sup>.

При точении  $F = S \cdot t$ , где  $S$  – подача, м/об;  $t$  – фактическая глубина резания, м.

При шлифовании  $F = Q/V_{кр}$ , где  $Q = \pi \cdot D \cdot t \cdot S_{прод}$  – производительность обработки, м<sup>3</sup>/с;  $D$  – диаметр обрабатываемой детали, м;  $t$  – фактическая глубина шлифования, м;  $S_{прод}$  – скорость продольной подачи, м/с;  $V_{кр}$  – скорость круга, м/с. Тогда зависимость (1) с учетом зависимости (2) примет вид:

$$\frac{\pi \cdot D \cdot S_{прод} \cdot t \cdot \sigma}{K_{рез} \cdot c \cdot V_{кр}} = n \cdot t_n - \sum_{i=1}^n t. \quad (3)$$

В работе [6] показано, что при шлифовании при относительно низкой жесткости технологической системы  $c$  справедливо условие  $y \geq t$  и величина упругого перемещения может быть описана зависимостью:

$$y = B_1 \cdot t, \quad (4)$$

где  $B_1 = \frac{\pi \cdot D \cdot S_{прод} \cdot \sigma}{K_{рез} \cdot c \cdot V_{кр}}$  – безразмерная величина.

Очевидно,  $B_1 \geq 1$  и зависимость (3) может быть представлена:

$$B_1 \cdot t = n \cdot t_n - \sum_{i=1}^n t. \quad (5)$$

В итоге получено уравнение относительно неизвестной величины  $t$ . В общем виде решить уравнение (5) сложно. Его можно решить поочередно для каждого прохода инструмента ( $n=1; 2; 3; 4$  и т.д.).

Так, при первом проходе инструмента уравнение (5) принимает вид:

$$B_1 \cdot t_1 = t_n - t_1, \quad (6)$$

где  $t_1$  – фактическая глубина шлифования при первом проходе, м.

Откуда

$$t_1 = \frac{t_n}{(1 + B_1)}. \quad (7)$$

Как видно, фактическая глубина шлифования  $t_1$  меньше номинальной глубины шлифования  $t_n$  в связи с возникновением в технологической системе упругого перемещения.

При втором проходе инструмента уравнение (5) принимает вид:

$$B_1 \cdot t_2 = 2 \cdot t_n - t_1 - t_2, \quad (8)$$

где  $t_2$  – фактическая глубина шлифования при втором проходе, м.

Исходя из уравнения (5), неизвестная величина  $t_2$  определяется:

$$t_2 = \frac{2 \cdot t_n - t_1}{(1 + B_1)} = \frac{2 \cdot t_n}{(1 + B_1)} - \frac{t_n}{(1 + B_1)^2}. \quad (9)$$

При третьем проходе инструмента уравнение (5) принимает вид:

$$B_1 \cdot t_3 = 3 \cdot t_n - t_1 - t_2 - t_3, \quad (10)$$

где  $t_3$  – фактическая глубина шлифования при третьем проходе, м.

Откуда неизвестная величина  $t_3$  определяется:

$$\begin{aligned} t_3 &= \frac{3 \cdot t_n - t_1 - t_2}{(1 + B_1)} = \frac{3 \cdot t_n}{(1 + B_1)} - \frac{t_n}{(1 + B_1)^2} - \frac{2 \cdot t_n}{(1 + B_1)^2} + \frac{t_n}{(1 + B_1)^3} = \\ &= \frac{3 \cdot t_n}{(1 + B_1)} - \frac{3 \cdot t_n}{(1 + B_1)^2} + \frac{t_n}{(1 + B_1)^3}. \end{aligned} \quad (11)$$

При четвертом проходе инструмента уравнение (5) принимает вид:

$$B_1 \cdot t_4 = 4 \cdot t_n - t_1 - t_2 - t_3 - t_4, \quad (12)$$

где  $t_4$  – фактическая глубина шлифования при четвертом проходе, м.

Откуда неизвестная величина  $t_4$  определяется:

$$\begin{aligned} t_4 &= \frac{4 \cdot t_n - t_1 - t_2 - t_3}{(1 + B_1)} = \frac{4 \cdot t_n}{(1 + B_1)} - \frac{t_n}{(1 + B_1)^2} - \frac{2 \cdot t_n}{(1 + B_1)^2} + \frac{t_n}{(1 + B_1)^3} - \\ &- \frac{3 \cdot t_n}{(1 + B_1)^2} + \frac{3 \cdot t_n}{(1 + B_1)^3} - \frac{t_n}{(1 + B_1)^4} = \frac{4 \cdot t_n}{(1 + B_1)} - \frac{6 \cdot t_n}{(1 + B_1)^2} + \frac{4 \cdot t_n}{(1 + B_1)^3} - \frac{t_n}{(1 + B_1)^4}. \end{aligned} \quad (13)$$

При пятом проходе инструмента уравнение (5) принимает вид:

$$B_1 \cdot t_5 = 5 \cdot t_n - t_1 - t_2 - t_3 - t_4 - t_5, \quad (14)$$

где  $t_5$  – фактическая глубина шлифования при четвертом проходе, м.

Откуда неизвестная величина  $t_5$  определяется:

$$t_5 = \frac{5 \cdot t_n - t_1 - t_2 - t_3 - t_4}{(1 + B_1)} = \frac{5 \cdot t_n}{(1 + B_1)} - \frac{10 \cdot t_n}{(1 + B_1)^2} + \frac{10 \cdot t_n}{(1 + B_1)^3} - \frac{5 \cdot t_n}{(1 + B_1)^4} + \frac{t_n}{(1 + B_1)^5}. \quad (15)$$

Нетрудно видеть, что полученные зависимости (7), (9), (11), (13) и (15)

являются разложениями биномиального ряда  $t_n \cdot \left\{ 1 - \left[ 1 - \frac{1}{(1+B_1)} \right]^n \right\}$ .

Например,

$$\begin{aligned} & t_n \cdot \left\{ 1 - \left[ 1 - \frac{1}{(1+B_1)} \right]^5 \right\} = \\ & = t_n \cdot \left\{ 1 - \left[ 1 - \frac{5}{(1+B_1)} + \frac{5 \cdot 4}{1 \cdot 2 \cdot (1+B_1)^2} - \frac{5 \cdot 4 \cdot 3}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot (1+B_1)^3} + \frac{5 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 2}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot (1+B_1)^4} - \frac{5 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 1}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5 \cdot (1+B_1)^5} \right] \right\} = \\ & = \frac{5 \cdot t_n}{(1+B_1)} - \frac{10 \cdot t_n}{(1+B_1)^2} + \frac{10 \cdot t_n}{(1+B_1)^3} - \frac{5 \cdot t_n}{(1+B_1)^4} + \frac{t_n}{(1+B_1)^5}; \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} & t_n \cdot \left\{ 1 - \left[ 1 - \frac{1}{(1+B_1)} \right]^4 \right\} = t_n \cdot \left\{ 1 - \left[ 1 - \frac{4}{(1+B_1)} + \frac{4 \cdot 3}{1 \cdot 2 \cdot (1+B_1)^2} - \frac{4 \cdot 3 \cdot 2}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot (1+B_1)^3} + \frac{4 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 1}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot (1+B_1)^4} \right] \right\} = \\ & = \frac{4 \cdot t_n}{(1+B_1)} - \frac{6 \cdot t_n}{(1+B_1)^2} + \frac{4 \cdot t_n}{(1+B_1)^3} - \frac{t_n}{(1+B_1)^4}; \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} & t_n \cdot \left\{ 1 - \left[ 1 - \frac{1}{(1+B_1)} \right]^3 \right\} = t_n \cdot \left\{ 1 - \left[ 1 - \frac{3}{(1+B_1)} + \frac{3 \cdot 2}{1 \cdot 2 \cdot (1+B_1)^2} - \frac{3 \cdot 2 \cdot 1}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot (1+B_1)^3} \right] \right\} = \\ & = \frac{3 \cdot t_n}{(1+B_1)} - \frac{3 \cdot t_n}{(1+B_1)^2} + \frac{t_n}{(1+B_1)^3}; \end{aligned} \quad (18)$$

$$t_n \cdot \left\{ 1 - \left[ 1 - \frac{1}{(1+B_1)} \right]^2 \right\} = t_n \cdot \left\{ 1 - \left[ 1 - \frac{2}{(1+B_1)} + \frac{2 \cdot 1}{1 \cdot 2 \cdot (1+B_1)^2} \right] \right\} = \frac{2 \cdot t_n}{(1+B_1)} - \frac{t_n}{(1+B_1)^2}. \quad (19)$$

Как видно, зависимости (15) и (16), (13) и (17), (11) и (18), (9) и (19) идентичны между собой. Следовательно, фактическая глубина шлифования  $t$  описывается зависимостью:

$$t = t_n \cdot \left\{ 1 - \left[ 1 - \frac{1}{(1+B_1)} \right]^n \right\} = t_n \cdot \left[ 1 - \frac{1}{\left( 1 + \frac{1}{B_1} \right)^n} \right]. \quad (20)$$

Величина упругого перемещения  $y$  аналитически выражается:

$$y = B_1 \cdot t = B_1 \cdot t_n \cdot \left[ 1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{B_1}\right)^n} \right]. \quad (21)$$

Произведение  $B_1 \cdot t_n$  равно величине установившегося упругого перемещения  $y_{уст} = B_1 \cdot t$ , определяемого равенством силы резания и силы упругости.

С учетом этого условия зависимость (21) выразится:

$$y = y_{уст} \cdot \left[ 1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{B_1}\right)^n} \right]. \quad (22)$$

Характер изменения отношения  $t/t_n$ , определяемого зависимостью (20), показан в табл. 1 и на рис. 1. С увеличением количества проходов инструмента  $n$  отношение  $t/t_n$  непрерывно увеличивается, асимптотически приближаясь к единице. При большем значении  $B_1$  отношение  $t/t_n$  больше.

Таблица 1. Расчетные значения отношения  $t/t_n$

$n$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$t/t_n$ (для $B_1 = 2$ )	0	0,33	0,56	0,7	0,8	0,87	0,91	0,94	0,96	0,97
$t/t_n$ (для $B_1 = 4$ )	0	0,2	0,36	0,49	0,59	0,67	0,74	0,79	0,83	0,87

Исходя из зависимости (22), по такому же закону изменяется и отношение  $y/y_{уст}$ , которое равно отношению  $t/t_n$  (рис. 1). Чтобы исключить переходной процесс шлифования с относительно низкой жесткостью технологической системы и повысить эффективность шлифования, необходимо обработку производить с начальным натягом в технологической системе, равным установившемуся значению упругого перемещения  $y_{уст}$ .

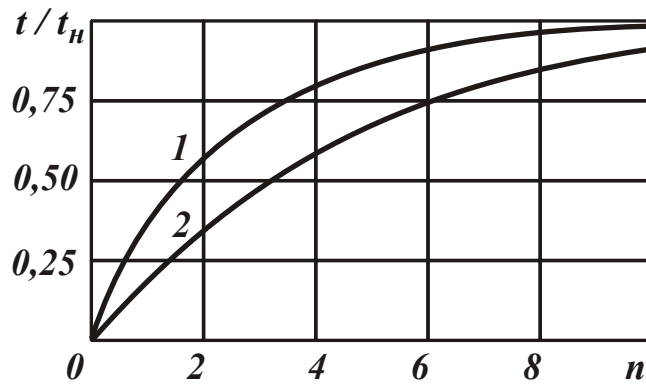


Рис. 1 – Зависимость  $t/t_n$  от  $n$ : 1 –  $B_1 = 2$ ; 2 –  $B_1 = 4$

**Выводы.** Разработана математическая модель определения погрешностей механической обработки с позиции баланса упругих перемещений, возникающих в технологической системе, и рабочих перемещений инструмента в процессе резания. Расчетами установлено, что величина упругого перемещения при шлифовании по жесткой схеме математически описывается биномиальным рядом. Доказано, что существует установившееся значение упругого перемещения, определяемого равенством силы резания и силы упругости, которое достигается через определенное время обработки. Исходя из этого, определены оптимальные параметры обработки при шлифовании с относительно низкой жесткостью технологической системы. В этих условиях величина упругого перемещения может многократно превосходить глубину шлифования, что требует создания в технологической системе начального натяга, равного установившемуся значению упругого перемещения.

**Список литературы:** 1. Маталин А.А. Технология машиностроения: учебник / А.А. Маталин. – Л.: Машиностроение, 1985. – 496 с. 2. Балакшин Б.С. Основы технологии машиностроения / Б.С. Балакшин. – М.: Машиностроение, 1969. – 359 с. 3. Управление процессом шлифования / А.В. Якимов, А.Н. Паршаков, В.И. Свирцев, В.П. Ларшин. – К.: Техніка, 1983. – 182 с. 4. Качество и производительность абразивно-алмазной обработки: учебное пособие / А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков, А.А. Якимов. – Одесса: ОГПУ, 1999. – 212 с. 5. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 1. "Механика резания материалов" – Одесса: ОНПУ, 2002. – 580 с. 6. Новіков Ф.В. Теоретичні основи механічної обробки високоточних деталей : монографія / Ф.В. Новіков, І.О. Рябенков. – Х. : Вид. ХНЕУ, 2013. – 352 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Matalin A.A. Tekhnologiya mashinostroeniya: uthebnik / A.A. Matalin. – L.: Mashinostroenie, 1985. – 496 s. 2. Balakshin B.S. Osnovy tekhnologiy mashinostroeniya / B.S. Balakshin. – M.: Mashinostroenie, 1969. – 359 s. 3. Upravlenie protsessom shlifovaniya / A.V. Yakimov, A.N. Parshakov, V.I. Svirshch, V.P. Larshin. – K.: Tekhnika, 1983. – 182 s. 4. Kathestvo i proizvoditelnost

abrazivno-almaznoy obrabotki: uthebnoe posobie / *A.V. Yakimov, F.V. Novikov, G.V. Novikov, A.A. Yakimov*. – Odessa: OGPU, 1999. – 212 s. **5.** Fiziko-matematicheskaya teoriya protsessov obrabotki materialov i tekhnologiy mashinostroeniya / Pod obsh. red. *F.V. Novikova i A.V. Yakimova*. V 10 tomakh. – T. 1. "Mekhanika rezaniya materialov" – Odessa: ONPU, 2002. – 580 s. **6.** *Novikov F.V.* Teoretychni osnovy mekhanichnoy obrobky vysokotothnykh detaley: monografiya / *F.V. Novikov, I.O. Ryabenkov*. – Kh.: Vyd. KhNEU, 2013. – 352 s.

*Надійшла до редакції 10.07.2015*