

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; σ – условное напряжение резания, Н/м²; F – площадь поперечного сечения среза, м².

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, м³/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:

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

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:

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

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:

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

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

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

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

При третьем проходе инструмента уравнение (5) принимает вид:

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

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

Откуда неизвестная величина t_3 определяется:

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

При четвертом проходе инструмента уравнение (5) принимает вид:

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

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

Откуда неизвестная величина t_4 определяется:

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

При пятом проходе инструмента уравнение (5) принимает вид:

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

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

Откуда неизвестная величина t_5 определяется:

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

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 $y_{уст}$.

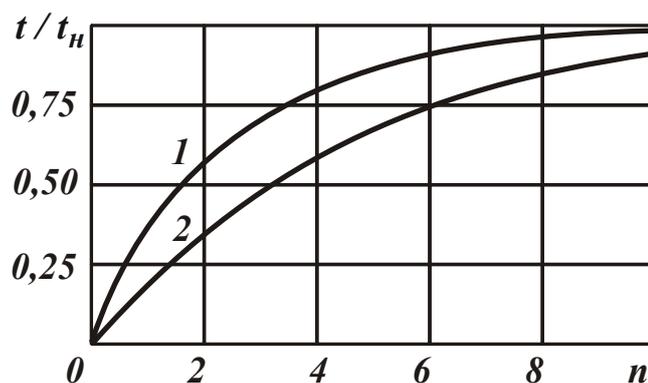


Рис. 1 – Зависимость t/t_n от n : 1 – $B_1 = 2$; 2 – $B_1 = 4$

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. Новиков Ф.В. Теоретичні основи механічної обробки високоточних деталей : монографія / Ф.В. Новиков, 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