

**Г.В. НОВИКОВ** (канд. техн. наук)  
**И.Е. ИВАНОВ** (канд. техн. наук, доц.)  
**С.А. ДИТИНЕНКО** (канд. техн. наук, доц.)  
Научный центр НТК “Эльбор”, г. Харьков

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФИНИШНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

### Введение

При механической обработке высокоточных деталей, особенно на операциях шлифования, постоянно возникают вопросы уменьшения упругих перемещений в технологической системе, которые в конечном итоге определяют точность обработки. Поэтому данным вопросам в научно-технической литературе уделяется большое внимание. Например, разработаны эффективные автоматизированные циклы круглого шлифования (включающие ускоренное врезание абразивного круга в обрабатываемый материал, этапы чернового и чистого шлифования, выхаживание), позволяющие исключить отрицательную роль упругих перемещений в формировании параметров точности и повысить производительность обработки [1]. Разработаны математические модели определения упругих перемещений и установлены условия их уменьшения [2, 3]. Однако, полученные решения справедливы для отдельных методов механической обработки, что не позволяет с единых позиций оценить истинные технологические возможности всего многообразия процессов резания лезвийными и абразивными инструментами с точки зрения повышения производительности и точности обработки. Поэтому важной и актуальной задачей является установление теоретического решения, связывающего производительность обработки и упругие перемещения в технологической системе и справедливого для различных методов механической обработки. Это позволит выявить, обосновать и реализовать условия повышения эффективности механической обработки, разработать новые методики проектирования и оптимизации структуры и параметров технологических процессов. Цель работы – повышение точности и производительности финишной механической обработки лезвийными и абразивными инструментами с учетом упругих перемещений в технологической системе.

### Основное содержание работы

В основу решения положено известное дифференциальное уравнение интенсивности съема материала при продольном точении [4]:

$$\frac{dv}{d\tau} + M \cdot v = N \cdot \tau, \quad (1)$$

где  $M = \frac{V_{рез} \cdot K_{рез} \cdot c}{\pi \cdot D_{дет} \cdot l_{дет} \cdot \sigma}$ ;  $N = \frac{V_{рез}^2 \cdot K_{рез} \cdot c \cdot t}{\pi \cdot D_{дет} \cdot \sigma}$ ;  $v$  – объем снятого материала, м<sup>3</sup>;  $\tau$  – время обработки, с;  $V_{рез}$  – скорость резания, м/с;  $K_{рез} = P_z / P_y$ ;  $P_z$ ,  $P_y$  – тангенциальная и радиальная составляющие силы резания, Н;  $\sigma$  – условное напряжение резания, Н/м<sup>2</sup>;  $c$  – жесткость технологической системы, Н/м;  $D_{дет}$  – диаметр детали, м;  $l_{дет}$  – длина хода при продольном точении, м;  $t$  – глубина резания, м.

В результате решения уравнения (1) получены зависимости для определения производительности обработки  $Q$ , величины упругого перемещения  $y$  и  $P_y = c \cdot y$ :

$$Q = Q_0 - \left( Q_0 - \frac{y_0 \cdot V_{рез} \cdot K_{рез} \cdot c}{\sigma} \right) \cdot e^{(-\beta \cdot \tau)}, \quad (2)$$

$$y = y_{ном} - (y_{ном} - y_0) \cdot e^{(-\bar{\beta} \cdot \tau)}, \quad (3)$$

$$P_y = c \cdot y_{ном} - c \cdot (y_{ном} - y_0) \cdot e^{(-\bar{\beta} \cdot \tau)}, \quad (4)$$

где  $Q_0 = t \cdot S_{прод} \cdot V_{рез}$  – номинальная производительность обработки при продольном точении, м<sup>3</sup>/с;  $S_{прод}$  – продольная подача на оборот детали, м/об;  $y_0$  – начальный натяг в

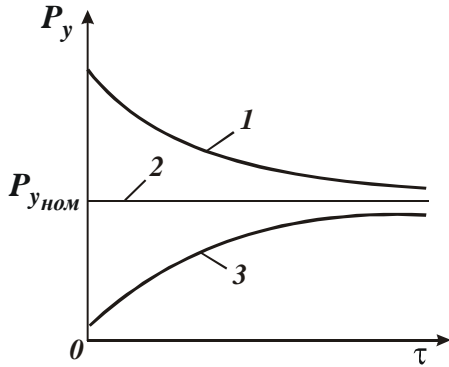


Рис. 1. Зависимость  $P_y$  от  $\tau$ :

- 1 –  $P_{y_0} > P_{y_{ном}}$  ( $y_0 > y_{ном}$ );
- 2 –  $P_{y_0} = P_{y_{ном}}$  ( $y_0 = y_{ном}$ );
- 3 –  $P_{y_0} < P_{y_{ном}}$  ( $y_0 < y_{ном}$ ).

технологической системе, м;  $y_{ном} = \frac{\sigma \cdot Q_0}{V_{рез} \cdot K_{рез} \cdot c}$  и

$$\bar{\beta} = \frac{V_{рез} \cdot K_{рез} \cdot c}{\pi \cdot D_{дет} \cdot l_{дет} \cdot \sigma}.$$

Как следует из рис. 1, построенного на основе зависимости (4), характер изменения параметров  $P_y$  (соответственно  $Q$ ,  $y$ ) с течением времени обработки  $\tau$  может быть самым разнообразным. Все зависит от соотношения параметров  $y_{ном}$  и  $y_0$ . При условии  $y_{ном} > y_0$  параметр  $P_y$  (соответственно  $Q$ ,  $y$ ) увеличиваются во времени, асимптотически приближаясь соответственно к значениям:  $P_{y_{ном}}$ ,  $Q_0$ ,  $y_{ном}$ . При условии  $y_{ном} = y_0$  параметры  $P_y$ ,  $Q$  и  $y$  остаются неизменными с течением времени обработки и принимают соответственно значения  $P_{y_{ном}}$ ,  $Q_0$ ,

$y_{ном}$ . При условии  $y_{ном} < y_0$  параметры  $P_y$ ,  $Q$  и  $y$  уменьшаются с течением времени обработки, асимптотически приближаясь соответственно к значениям  $P_{y_{ном}}$ ,  $Q_0$ ,  $y_{ном}$ .

Полученное решение носит общий характер и может быть применено не только для продольного точения, но и продольного шлифования, а также других методов лезвийной и абразивной обработки. Исходя из этого, применяемые на практике схемы механической обработки можно классифицировать по признаку изменения радиальной составляющей силы резания  $P_y$  во времени:

- 1) схемы, характеризующиеся увеличением  $P_y$  с течением времени обработки (основанные на жесткой схеме обработки);
- 2) схемы, характеризующиеся постоянством  $P_y$  с течением времени обработки (основанные на упругой схеме обработки с фиксированным радиальным усилием);
- 3) схемы, характеризующиеся уменьшением  $P_y$  во времени обработки (основанные на упругой схеме обработки с начальным натягом в технологической системе).

Случай 1 реализуется на практике при механической обработке как лезвийными, так и абразивными инструментами, а случаи 2 и 3 – при механической обработке абразивными инструментами (так называемые упругие схемы шлифования и доводки, а также схема выхаживания – обработка с отключенной радиальной подачей станка).

Из зависимости (4) следует, что добиться существенного уменьшения параметра  $y$  (повышения точности обработки) можно за счет выполнения условия  $y_0 > y_{ном} = 0$ , т.е. производя обработку по упругой схеме с начальным натягом в технологической системе  $y_0$ . При этом (рис. 1) обеспечивается наибольшая производительность обработки  $Q$ . Причем, с увеличением величины  $y_0$  производительность обработки  $Q$  увеличивается.

Очевидно, чем выше режущая способность инструмента (больше  $K_{рез}$  и меньше условное напряжение резания  $\sigma$ ), тем больше величина  $y_0$  и  $Q$ .

Учитывая сложность анализа приведенных зависимостей, в связи с наличием в них экспоненциальной функции, получим упрощенное решение уравнения (1). В первом приближении примем  $v = Q \cdot \tau$  и  $\frac{dv}{d\tau} = Q$ . Это позволяет перейти от дифференциального уравнения (1) к простому линейному алгебраическому уравнению:

$$Q + M \cdot Q \cdot \tau = N \cdot \tau. \quad (5)$$

Его решение:

$$Q = \frac{N}{\left(\frac{1}{\tau} + M\right)}. \quad (6)$$

Зная  $Q$ , несложно определить параметры  $y$  и  $P_y$ . Применительно к схеме шлифования прямолинейного образца, движущегося по нормали к рабочей поверхности круга, радиальная составляющая силы резания  $P_y = c \cdot y$  может быть выражена

$$P_y = P_{y_{ном}} \cdot \frac{\left(1 + \frac{P_{y_0}}{Q_0 \cdot c} \cdot \frac{F}{\tau}\right)}{\left(1 + \frac{P_{y_{ном}}}{Q_0 \cdot c} \cdot \frac{F}{\tau}\right)}, \quad (7)$$

где  $P_{y_0} = c \cdot y_0$ ;  $P_{y_{ном}} = c \cdot y_{ном}$ ;  $F$  – площадь поперечного сечения образца, м<sup>2</sup>.

Характер изменения  $P_y$  с течением времени обработки  $\tau$  для различных соотношений параметров  $P_{y_0}$  и  $P_{y_{ном}}$  (а также соотношений параметров  $y_0$  и  $y_{ном}$ ) соответствует графикам, показанным на рис. 1, откуда можно сделать следующие выводы:

1. При обработке по жесткой схеме ( $Q_0 = const$ ) радиальная составляющая силы резания  $P_y$  с течением времени обработки будет увеличиваться или в самом лучшем случае оставаться постоянной в зависимости от характера изменения отношения  $K_{рез} / \sigma$ . Поэтому, жесткую схему шлифования следует рассматривать как схему с увеличивающейся во времени радиальной составляющей силы резания  $P_y$  и соответственно величиной упругого перемещения  $y$ .

2. Схему выхаживания при шлифовании в связи с уменьшением во времени производительности обработки следует рассматривать как схему с уменьшающимися во времени параметрами  $P_y$  и  $y$ .

Как показано выше, все возможные схемы обработки можно классифицировать по характеру изменения во времени параметров  $P_y$  и  $y$ : 1) схемы, характеризующиеся увеличением во времени параметров  $P_y$  и  $y$  (для  $P_{y_0} < P_{y_{ном}}$ ;  $y_0 < y_{ном}$ ); 2) схемы, характеризующиеся постоянством во времени параметров  $P_y$  и  $y$  (для  $P_{y_0} = P_{y_{ном}}$ ;  $y_0 = y_{ном}$ ); 3) схемы, характеризующиеся уменьшением во времени параметров  $P_y$  и  $y$

(для  $P_{y_0} > P_{y_{ном}}$ ;  $y_0 > y_{ном}$ ).

Для первой схемы зависимость (7) с учетом  $P_{y_0} = 0$  принимает вид

$$P_y = \frac{P_{y_{ном}}}{\left(1 + \frac{P_{y_{ном}} \cdot F}{Q_0 \cdot c \cdot \tau}\right)}. \quad (8)$$

Для второй схемы зависимость (7) с учетом  $P_y = P_{y_{ном}}$  принимает вид

$$P_{y_0} = \frac{\sigma \cdot Q_0}{K_{рез} \cdot V}. \quad (9)$$

Реализовать условие  $y = y_0$  целесообразно за счет применения упругой схемы обработки с фиксированным радиальным усилием  $P_{y_0}$ . Проанализируем технологические возможности данной схемы, используя зависимость (9).

С течением времени обработки по мере снижения режущей способности инструмента отношение  $\sigma / K_{рез}$  будет увеличиваться. При условии  $P_{y_0} = c \cdot y_0 = const$  это приведет к уменьшению производительности обработки. Следовательно, в зависимости (9) вместо номинальной производительности  $Q_0$  необходимо рассматривать фактическую производительность, которая, исходя из зависимости (9), выразится

$$Q_{ф} = \frac{K_{рез} \cdot V \cdot P_{y_0}}{\sigma}. \quad (10)$$

Для того чтобы стабилизировать величину  $Q_{ф}$  на определенном уровне, например, на уровне  $Q_{ф} = Q_0$  в связи с затуплением инструмента и уменьшением отношения  $K_{рез} / \sigma$ , исходя из зависимости (10), необходимо увеличить скорость резания  $V$  при условии  $P_{y_0} = c \cdot y_0 = const$ . Однако, более эффективным путем следует рассматривать стабилизацию во времени отношения  $K_{рез} / \sigma$ , что достигается при лезвийной и абразивной (алмазно-абразивной) обработке различными методами. С точки зрения обеспечения параметров точности и качества обработки более эффективно применение третьей схемы обработки, характеризующейся уменьшением во времени параметров  $P_y$  и  $y_0$ , т.е. схемы выхаживания. Первоначально рассмотрим схему шлифования с увеличивающимися во времени параметрами  $P_y$  и  $y$  при условиях:  $y_0 = 0$ ;  $P_{y_0} = 0$ . Тогда

$$y = \frac{y_{ном}}{\left(1 + y_{ном} \cdot \frac{F}{Q \cdot \tau}\right)}. \quad (11)$$

Отношение  $Q / F$  равно скорости радиальной подачи  $V_{ф}$ . Тогда произведение  $V_{ф}$  и времени обработки  $\tau$  будет определять величину снятого припуска  $\Pi_{max}$ , т.е.  $\Pi_{max} = V_{ф} \cdot \tau = Q \cdot \tau / F$ . Преобразуем зависимость (11) с учетом данного выражения

$$y = \frac{P_{max}}{\left(1 + \frac{P_{max}}{y_{ном}}\right)}. \quad (12)$$

Как следует из зависимости (12), величина упругого перемещения  $y$  (определяющая точность размера обрабатываемой детали) тем меньше, чем меньше параметры  $y_{ном}$  и  $P_{max}$ . Получим зависимости для определения точности формы обрабатываемой цилиндрической детали. С физической точки зрения она обусловлена неравномерностью снимаемого припуска (погрешностью формы обработки на предшествующей операции). Предположим, что наибольший снимаемый припуск равен  $P_{max}$ , а наименьший –  $P_{min}$ . Тогда разность припусков  $\Delta P = P_{max} - P_{min}$  будет определять погрешность формы исходной цилиндрической заготовки. Погрешность формы обрабатываемой детали получим как разность величин упругих перемещений, возникающих в моменты обработки участков цилиндрической детали с наибольшим  $P_{max}$  и наименьшим  $P_{min}$  припусками. Тогда, с учетом зависимости (12), погрешность формы обрабатываемой детали (обозначим её как  $\Delta y$ ) определится:

$$\Delta y = y_{max} - y_{min} = \frac{\Delta P}{\left(1 + \frac{P_{max}}{y_{ном}}\right) \cdot \left(1 + \frac{P_{min}}{y_{ном}}\right)}. \quad (13)$$

В результате пришли к довольно сложной по структуре зависимости, в которой параметры  $P_{max}$  и  $P_{min}$  входят как в числитель, так и в знаменатель. С одной стороны, точность формы обрабатываемой цилиндрической детали (определяемой параметром  $\Delta y$ ) связана линейной зависимостью с параметром  $\Delta P$ , который определяет точность формы исходной цилиндрической заготовки. С другой стороны, входящие в знаменатель зависимости параметры  $P_{max}$  и  $P_{min}$  приводят к уменьшению  $\Delta y$ .

При выполнении условий  $P_{max}, P_{min} > y_{ном}$  зависимость (13) упростится

$$\Delta y = \frac{y_{ном}^2 \cdot \Delta P}{P_{max} \cdot P_{min}} = y_{ном}^2 \cdot \left(\frac{1}{P_{min}} - \frac{1}{P_{max}}\right). \quad (14)$$

В данном случае на параметр  $\Delta y$  существенное влияние оказывает величина  $y_{ном}$ . Однако, основное влияние на  $\Delta y$  оказывает разность параметров  $P_{max}$  и  $P_{min}$ , т.е. параметр  $\Delta P$ . Чем он меньше, тем меньше параметр  $\Delta y$  и меньше погрешность формы обрабатываемой детали. Пользуясь классическими понятиями технологии машиностроения, отношение параметров  $\Delta P$  и  $\Delta y$  определяет уточнение  $\varepsilon$ . Аналитическая зависимость для его определения с учетом зависимости (13) принимает вид

$$\varepsilon = \frac{\Delta P}{\Delta y} = \left(1 + \frac{P_{max}}{y_{ном}}\right) \cdot \left(1 + \frac{P_{min}}{y_{ном}}\right). \quad (15)$$

Уточнение  $\varepsilon$  тем больше, чем больше  $P_{max}$ ,  $P_{min}$  и меньше  $y_{ном}$ . При выполнении условий  $P_{max}, P_{min} > y_{ном}$  с учетом зависимости (15) уточнение  $\varepsilon$  равно

$$\varepsilon = \frac{\Delta P}{\Delta y} = \frac{P_{max} \cdot P_{min}}{y_{ном}^2}. \quad (16)$$

Из данной зависимости следует вполне однозначная связь между параметрами  $\varepsilon$  и  $y_{ном}$ ,  $P_{max}$ ,  $P_{min}$ . Если  $P_{max} = P_{min} = P$ , то зависимость (16) упрощается

$$\varepsilon = \left( \frac{P}{y_{ном}} \right)^2. \quad (17)$$

Из зависимости (17) вытекает, что уточнение  $\varepsilon$  связано с соотношением  $P/y_{ном}$  квадратичной зависимостью. Из курса технологии машиностроения известно, что величина, обратная уточнению  $\varepsilon$ , называется коэффициентом уменьшения погрешности и обозначается как  $K_y$ . Тогда  $K_y$  с учетом зависимости (15) примет вид

$$K_y = \frac{1}{\varepsilon} = \frac{\Delta y}{\Delta P} = \frac{1}{\left(1 + \frac{P_{max}}{y_{ном}}\right) \cdot \left(1 + \frac{P_{min}}{y_{ном}}\right)}. \quad (18)$$

Как видно, коэффициент уменьшения погрешности  $K_y$  тем меньше, чем больше параметры  $P_{max}$ ,  $P_{min}$  и меньше величина  $y_{ном}$ . Таким образом, получены аналитические зависимости для определения двух важнейших параметров технологии машиностроения – коэффициента уменьшения погрешности  $K_y$  и уточнения  $\varepsilon$ . Они справедливы для различных методов механической обработки, а их использование открывает новые возможности анализа и прогнозирования путей повышения точности и производительности механической обработки.

### Выводы

Получены аналитические зависимости для определения основных параметров точности обработки, обусловленных возникающими в технологической системе упругими перемещениями. Показана возможность классификации всего многообразия кинематических схем механической обработки (лезвийными и абразивными инструментами) по признаку изменения (увеличения, уменьшения или постоянства) радиального усилия (радиальной составляющей силы резания) с течением времени обработки. Определены основные условия повышения точности и производительности обработки, состоящие в повышении режущей способности инструментов и применении упругой схемы обработки (шлифования) с начальным натягом в технологической системе.

### Список литературы

1. Лурье Г.Б. Прогрессивные методы круглого наружного шлифования / Г.Б. Лурье. – Л.: Машиностроение, 1984. – 103 с. – **Библиогр.: с. 102 (7 названий)**.
2. Тверской М.М. Автоматическое управление режимами обработки деталей на станках / М.М. Тверской. – М.: Машиностроение, 1982. – 208 с. – **Библиогр.: с. 205-207 (55 названий)**.
3. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения: **в 10 т.** / под общ. ред. Новикова Ф. В. и Якимова А. В. – Одесса: ОНПУ, 2002. – ISBN 966-7810-33-X. Т. 1: Механика резания материалов. – 2002. – 580 с. – **Библиогр.: с. 555–573.** – ISBN 966-7810-34-8 (в пер.).

4. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения: **в 10 т.** / под общ. ред. Новикова Ф. В. и Якимова А. В. – Одесса: ОНПУ, 2002. – ISBN 966-7810-33-X. Т. 10: Концепции развития технологии машиностроения. – 2005. – 565 с. – *Библиогр.: с. 499-524.* – ISBN 966-7810-64-X (в пер.).

Надійшла до редакції 17.02.2012