

## **Повышение эффективности финишной механической обработки деталей машин**

*Харьковский национальный экономический университет  
имени Семена Кузнеця*

Определены основные условия повышения точности и производительности обработки, состоящие в повышении режущей способности инструментов и применении упругой схемы обработки (шлифования) с предварительным натягом в технологической системе. 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.

**Ключевые слова:** точность, производительность, механическая обработка, режущий инструмент, упругое перемещение.

### **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 черного и чистого шлифования, выхаживание), позволяющие исключить отрицательную роль упругих перемещений в формировании параметров точности и повысить производительность обработки [1].

### **Состояние вопроса**

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.

### Постановка задачи

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  $P_y = c \cdot y$ :

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

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

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

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 технологической системе, м;

$$y_{ном} = \frac{\sigma \cdot Q_0}{V_{рез} \cdot K_{рез} \cdot c} \quad \text{и} \quad \bar{\beta} = \frac{V_{рез} \cdot K_{рез} \cdot c}{\pi \cdot D_{дет} \cdot l_{дет} \cdot \sigma}.$$

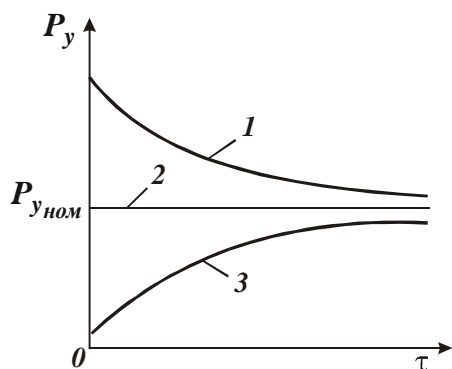


Рис. 1. Зависимость  $P_y$  от  $\tau$ :

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

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).

### Результаты исследований

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  $P_{y_0} = c \cdot y_0$ ;  $P_{y_{ном}} = c \cdot y_{0_{ном}}$ ;  $F$  – 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

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

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

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

Для того чтобы стабилизировать величину  $Q_{\phi}$  на определенном уровне, например, на уровне  $Q_{\phi} = Q_0$  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  $V_{\phi}$ . Тогда произведение  $V_{\phi}$  и времени обработки  $\tau$  будет определять величину снятого припуска  $\Pi_{max}$ , т.е.  $\Pi_{max} = V_{\phi} \cdot \tau = Q \cdot \tau / F$ . Преобразуем зависимость (11) с учетом данного выражения

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

Как следует из зависимости (12), величина упругого перемещения  $y$  (определяющая точность размера обрабатываемой детали) тем меньше, чем меньше параметры  $y_{ном}$  и  $\Pi_{max}$ . 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  $\Pi_{max}$ , а наименьший –  $\Pi_{min}$ . Тогда разность припусков  $\Delta\Pi = \Pi_{max} - \Pi_{min}$  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  $\Pi_{max}$  и наименьшим  $\Pi_{min}$  припусками. Тогда, с учетом зависимости (12), погрешность формы обрабатываемой детали (обозначим её как  $\Delta y$ ) определится:

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

В результате пришли к довольно сложной по структуре зависимости, в которой параметры  $\Pi_{max}$  и  $\Pi_{min}$  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  $\Delta\Pi$ , который определяет точность формы исходной цилиндрической заготовки. С другой стороны, входящие в знаменатель зависимости параметры  $\Pi_{max}$  и  $\Pi_{min}$  приводят к уменьшению  $\Delta y$ .

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

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

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

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

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

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

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

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

Из зависимости (17) вытекает, что уточнение  $\varepsilon$  связано с соотношением  $\Pi / y_{ном}$  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:

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

Как видно, коэффициент уменьшения погрешности  $K_y$  тем меньше, чем больше параметры  $\Pi_{max}$ ,  $\Pi_{min}$  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

1. Получены аналитические зависимости для определения основных параметров точности обработки, обусловленных возникающими в технологической системе упругими перемещениями.
2. 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.
3. 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.
2. Тверской М. М. Автоматическое управление режимами обработки деталей на станках / М. М. Тверской. – М. : Машиностроение, 1982. – 208 с.
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. – Т. 1: Механика резания материалов. – 2002. – 580 с.
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. – Х. Т. 10: Концепции развития технологии машиностроения. – 2005. – 565 с.

Поступила в редакцию 17.06.2016

## **Підвищення ефективності фінішної механічної обробки деталей машин**

Визначено основні умови підвищення точності і продуктивності обробки, що складаються в підвищенні ріжучої здатності інструментів і застосуванні пружною схеми обробки (шліфування) з попереднім натягом в технологічній системі. Отримано аналітичні залежності для визначення основних параметрів точності обробки, обумовлених виникаючими в технологічній системі пружними переміщеннями. Показана можливість класифікації всього різноманіття кінематичних схем механічної обробки (лезовими і абразивними інструментами) за ознакою зміни (збільшення, зменшення або сталості) радіального зусилля (радіальної складової сили різання) з плином часу обробки.

**Ключові слова:** точність, продуктивність, механічна обробка, різальний інструмент, пружне переміщення.

## **Improved Finish Mechanical Processing Details of Machines**

The main conditions for increasing productivity and processing accuracy, consisting in increasing the cutting power tools and processing circuitry applying elastic (grinding) prestressed in the process system. Analytical dependence for determining the basic parameters of the processing accuracy due to arise in the process system elastic movements. The possibility of classification of the whole variety of schemes kinematic machining (cutting and abrasive tools) on the basis of change (increase, decrease or constancy) radial force (the radial component of the cutting forces) in the course of processing time.

**Keywords:** accuracy, productivity, machining, cutting tool, elastic movement.

### **Сведения об авторе:**

**Стрельчук Роман Михайлович** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры естественных наук и технологий, Харьковский национальный экономический университет им. Семе́на Кузнеца, Украина.