

Ф.В. Новиков, докт. техн. наук, В.А. Фадеев, канд. техн. наук  
Харьков, Украина

## УПРОЩЕННЫЙ РАСЧЕТ И АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ТОЧНОСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

*In work the simplified approach to calculation and the analysis of parameters of accuracy of machining is offered.*

Вопросы обеспечения высокой точности механической обработки являются чрезвычайно важными и актуальными для машиностроения. Эти вопросы отражены в многочисленных работах, опубликованных в научно-технической литературе. В наших работах [1,2 и других] сформулирован новый теоретический подход к расчету и анализу параметров точности обработки, получены важные аналитические зависимости основных параметров точности обработки.

Целью настоящей работы является развитие данного подхода, упрощение аналитических зависимостей основных параметров точности обработки и на их основе выявление новых технологических возможностей повышения точности обработки.

В работе [3] получена аналитическая зависимость величины упругого перемещения  $y$ , возникающего в процессе механической обработки:

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

где  $y_{ном} = \frac{\sigma \cdot Q}{c \cdot K_{рез} \cdot V}$  - номинальное значение величины  $y$ ;  $\sigma$  - условное напряжение резания, Н/м<sup>2</sup>;  $K_{рез} = P_z / P_y$  - коэффициент резания;  $P_z$ ,  $P_y$  - тангенциальная и радиальная составляющие силы резания, Н;  $c$  - приведенная жесткость технологической системы, Н/м;  $Q$  - производительность обработки, м<sup>3</sup>/с;  $V$  - скорость резания, м/с;  $F$  - площадь обрабатываемой поверхности, м<sup>2</sup>;  $\tau$  - время обработки, с.

Входящее в зависимость (1) 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.  $\Pi_{max} = V_\phi \cdot \tau = \frac{Q}{F} \cdot \tau$ .

Преобразуем зависимость (1) с учетом данного выражения

$$y = \frac{y_{ном}}{\left(1 + \frac{y_{ном}}{\Pi_{max}}\right)} = \frac{1}{\left(\frac{1}{y_{ном}} + \frac{1}{\Pi_{max}}\right)} = \frac{1}{\frac{1}{\Pi_{max}} \cdot \left(1 + \frac{\Pi_{max}}{y_{ном}}\right)} = \frac{\Pi_{max}}{\left(1 + \frac{\Pi_{max}}{y_{ном}}\right)}. \quad (2)$$

Как следует из зависимости (2), величина упругого перемещения  $y$  (определяющая точность размера обрабатываемой детали) тем меньше, чем меньше параметры  $y_{ном}$  и  $\Pi_{max}$ .

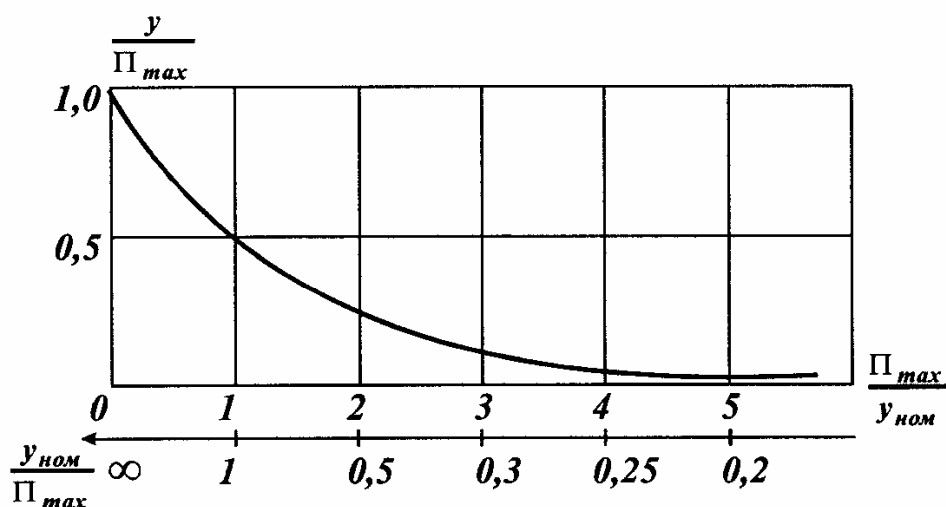


Рис.1. Зависимость безразмерной величины  $\frac{y}{\Pi_{max}}$  от безразмерной величины  $\frac{\Pi_{max}}{y_{ном}}$ .

На рис. 1 графически показан характер изменения безразмерной величины  $\frac{y}{\Pi_{max}}$  с увеличением безразмерной величины  $\frac{\Pi_{max}}{y_{ном}}$ .

Получим расчетные зависимости для определения точности формы обрабатываемой 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 заготовки. Погрешность формы обрабатываемой детали получим как разность величин упругих перемещений, возникающих в моменты обработки участков детали с наибольшим  $\Pi_{max}$  и наименьшим  $\Pi_{min}$  припусками. Тогда, с учетом зависимости (2), погрешность формы обрабатываемой детали (обозначим её как  $\Delta y$ ) определится:

$$\begin{aligned} \Delta y = y_{max} - y_{min} &= \frac{1}{\left(\frac{1}{y_{ном}} + \frac{1}{\Pi_{max}}\right)} - \frac{1}{\left(\frac{1}{y_{ном}} + \frac{1}{\Pi_{min}}\right)} = \\ &= \frac{1}{\frac{1}{\Pi_{max}} \cdot \left(1 + \frac{\Pi_{max}}{y_{ном}}\right)} - \frac{1}{\frac{1}{\Pi_{min}} \cdot \left(1 + \frac{\Pi_{min}}{y_{ном}}\right)} = \frac{\Delta\Pi}{\left(1 + \frac{\Pi_{max}}{y_{ном}}\right) \cdot \left(1 + \frac{\Pi_{min}}{y_{ном}}\right)} \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\Delta\Pi = \Pi_{max} - \Pi_{min}$ .

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 детали (определяемой параметром  $\Delta y$ ) связана линейной зависимостью с параметром  $\Delta \Pi$ , который определяет точность формы исходной заготовки. С другой стороны, входящие в знаменатель зависимости параметры  $\Pi_{max}$  и  $\Pi_{min}$  приводят к уменьшению параметра  $\Delta y$ .

При выполнении условий  $\Pi_{max}, \Pi_{min} > y_{ном}$  зависимость (3) упрощается

$$\Delta y = \frac{y_{ном}^2 \cdot \Delta \Pi}{\Pi_{max} \cdot \Pi_{min}} = y_{ном}^2 \cdot \left( \frac{1}{\Pi_{min}} - \frac{1}{\Pi_{max}} \right). \quad (4)$$

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 (3) принимает вид

$$\varepsilon = \frac{\Delta \Pi}{\Delta y} = \left( 1 + \frac{\Pi_{max}}{y_{ном}} \right) \cdot \left( 1 + \frac{\Pi_{min}}{y_{ном}} \right). \quad (5)$$

Как следует из зависимости (5), уточнение  $\varepsilon$  тем больше, чем больше параметры  $\Pi_{max}$ ,  $\Pi_{min}$  и меньше величина  $y_{ном}$ .

При выполнении условий  $\Pi_{max}, \Pi_{min} > y_{ном}$  с учетом зависимости (5) величина уточнения  $\varepsilon$  определится

$$\varepsilon = \frac{\Delta \Pi}{\Delta y} = \frac{\Pi_{max} \cdot \Pi_{min}}{y_{ном}^2}. \quad (6)$$

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 (6) упрощается

$$\varepsilon = \left( \frac{\Pi}{y_{ном}} \right)^2. \quad (7)$$

Из зависимости (7) вытекает, что уточнение  $\varepsilon$  связано с соотношением  $\frac{\Pi}{y_{ном}}$  квадратичной зависимостью.

Из курса технологии машиностроения известно, что величина, обратная уточнению  $\varepsilon$ , называется коэффициентом уменьшения погрешности и обозначается как  $K_y$ .

Тогда зависимость для определения коэффициента уменьшения погрешности  $K_y$  с учетом зависимости (5) примет вид

$$K_y = \frac{1}{\varepsilon} = \frac{\Delta y}{\Delta \Pi} = \frac{1}{\left( 1 + \frac{\Pi_{max}}{y_{ном}} \right) \cdot \left( 1 + \frac{\Pi_{min}}{y_{ном}} \right)}. \quad (8)$$

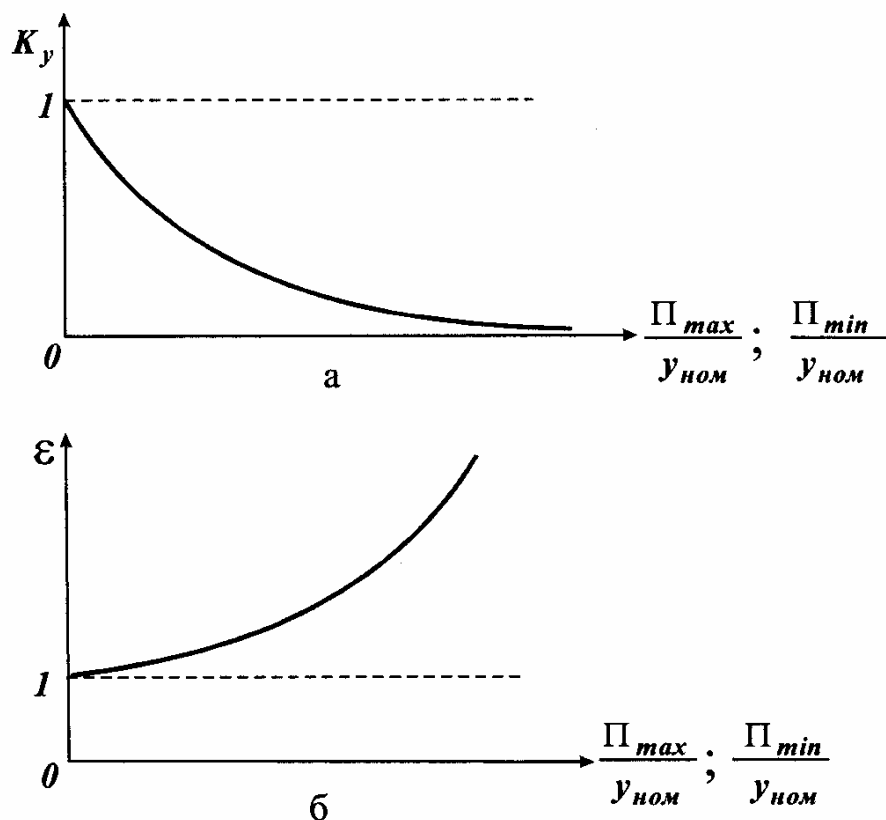


Рис. 2. Зависимости коэффициента уменьшения погрешности  $K_y$  (а) и уточнения  $\varepsilon$  (б) от отношений  $\frac{\Pi_{max}}{y_{ном}}$  и  $\frac{\Pi_{min}}{y_{ном}}$ .

Коэффициент уменьшения погрешности  $K_y$  тем меньше, чем больше параметры  $\Pi_{max}$ ,  $\Pi_{min}$  и меньше величина  $y_{ном}$ .

На рис. 2 графически показан характер изменения коэффициента уменьшения погрешности  $K_y$  и уточнения  $\varepsilon$  с увеличением отношений  $\frac{\Pi_{max}}{y_{ном}}$  и  $\frac{\Pi_{min}}{y_{ном}}$ .

Таким образом, получены аналитические зависимости для определения двух важнейших параметров технологии машиностроения - коэффициента уменьшения погрешности  $K_y$  и уточнения  $\varepsilon$ . Это открывает новые возможности анализа и прогнозирования путей повышения точности механической обработки.

Проведем анализ условий уменьшения параметров  $y$  и  $\Delta y$ . Из приведенных выше зависимостей нетрудно видеть, что основным путем уменьшения параметров  $y$  и  $\Delta y$  является уменьшение величины  $y_{ном} = \frac{\sigma}{K_{рез}} \cdot \frac{Q_0}{c \cdot V}$ . Уменьшение этой величины предполагает увеличение параметров  $c, V$  и уменьшение параметров  $Q_0$  и  $\frac{\sigma}{K_{рез}}$ , рис.3.

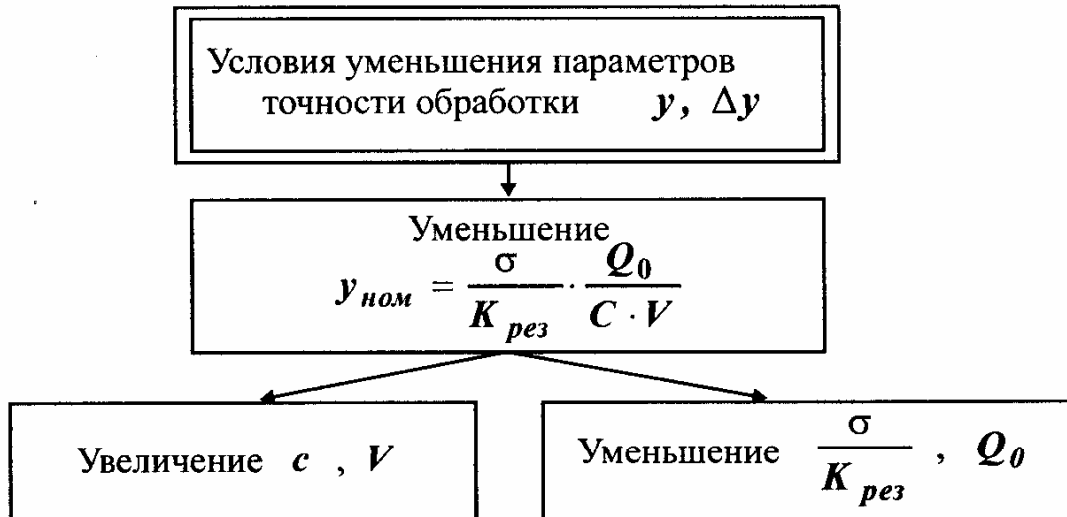


Рис. 3. Структурная схема условий уменьшения параметров  $y$  и  $\Delta y$ .

Выше приведена общая методика расчета параметров точности обработки  $y$ ,  $\Delta y$ ,  $\varepsilon$  и  $K_y$ . Данную методику можно упростить, если учесть, что при условии  $\frac{P_{max}}{y_{ном}} > 3$  зависимость (1) принимает простой вид

$$y \approx y_{ном}. \quad (9)$$

Тогда параметр  $\Delta y$  определится зависимостью (4), параметр  $\varepsilon$  - зависимостью (6), а параметр  $K_y$  - следующей зависимостью

$$K_y = \frac{1}{\varepsilon} = \frac{y_{ном}^2}{P_{max} \cdot P_{min}}. \quad (10)$$

Используя зависимости (9) и (4), можно предложить следующие алгоритмы расчета оптимальных условий обработки, обеспечивающие требуемые значения параметров точности обработки  $y$  и  $\Delta y$ :

$$\begin{cases} y = y_{ном} = \frac{\sigma}{K_{рез}} \cdot \frac{Q_0}{c \cdot V}, \\ \Delta y = \frac{\Delta P}{P_{max} \cdot P_{min}} \cdot y_{ном}^2, \end{cases} \quad (11)$$

- 1) для заданных значений  $y$  и  $\Delta y$  на основе системы уравнений (11) производится выбор значений  $Q_0, c, V, \frac{\sigma}{K_{рез}}$  и соответственно значений  $P_{max}$  и  $P_{min}$ ;
- 2) для заданных значений  $y$ ,  $\Delta y$  и  $P_{max}$ ,  $P_{min}$  производится выбор значений  $Q_0, c, V, \frac{\sigma}{K_{рез}}$ .

В общем виде величина упругого перемещения  $y$  определяется следующей зависимостью [3]:

$$y = \frac{y_0 + Q \cdot \frac{\tau}{F}}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{рез} \cdot V \cdot \tau}{\sigma \cdot F}\right)} = \frac{y_0 + Q \cdot \frac{\tau}{F}}{\left(1 + \frac{1}{y_{ном}} \cdot \frac{Q \cdot \tau}{F}\right)}, \quad (12)$$

где  $y_0$  - начальный натяг в технологической системе, м.

Соотношение  $Q/F$ , как показано выше, равно скорости радиальной подачи  $V_\phi$ . Тогда с учетом зависимости  $V_\phi \cdot \tau = \Pi_{max}$  зависимость (12) примет вид:

$$y = \frac{y_0 + \Pi_{max}}{\left(1 + \frac{\Pi_{max}}{y_{ном}}\right)}. \quad (13)$$

Уменьшить величину упругого перемещения  $y$  для данной схемы обработки и тем самым повысить точность обработки можно за счет выполнения условия  $y_0 = 0$ , т.е. исключая начальный натяг  $y_0$  в технологической системе.

Таким образом, проведен расчет и анализ точности обработки для схем, характеризующихся увеличением во времени радиальной составляющей силы резания  $P_y$  и величины упругого перемещения  $y$ .

Проведем расчет и анализ точности обработки для схем, характеризующихся постоянством и уменьшением во времени параметров  $P_y$  и  $y$

Для второй схемы обработки, характеризующейся постоянством во времени параметров  $P_y$  и  $y$ , справедливы соотношения:

$$y = y_0 = y_{ном} = \frac{\sigma}{K_{рез}} \cdot \frac{Q_0}{c \cdot V} = \frac{P_{y_{ном}}}{c}. \quad (14)$$

Условия уменьшения величины упругого перемещения  $y$  для данной схемы показаны на рис. 4.

Для третьей схемы, характеризующейся уменьшением во времени параметров  $P_y$  и  $y$  (схемы выхаживания), справедливы соотношения:  $y_0 = \Pi_{max} > y_{ном}$  и  $Q_0 = 0$ . Величина упругого перемещения  $y$  (точность размера обрабатываемой детали) определяется зависимостью

$$y = \frac{\Pi_{max}}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{рез} \cdot V \cdot \tau}{\sigma \cdot F}\right)}. \quad (15)$$

Точность формы обрабатываемой детали  $\Delta y$  определяется разностью максимального  $y_{max}$  и минимального  $y_{min}$  значений упругих перемещений. Тогда с учетом зависимости (15), получим

$$\Delta y = \frac{\Delta \Pi}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{рез} \cdot V \cdot \tau}{\sigma \cdot F}\right)}, \quad (16)$$

где  $\Delta \Pi = \Pi_{max} - \Pi_{min}$ .

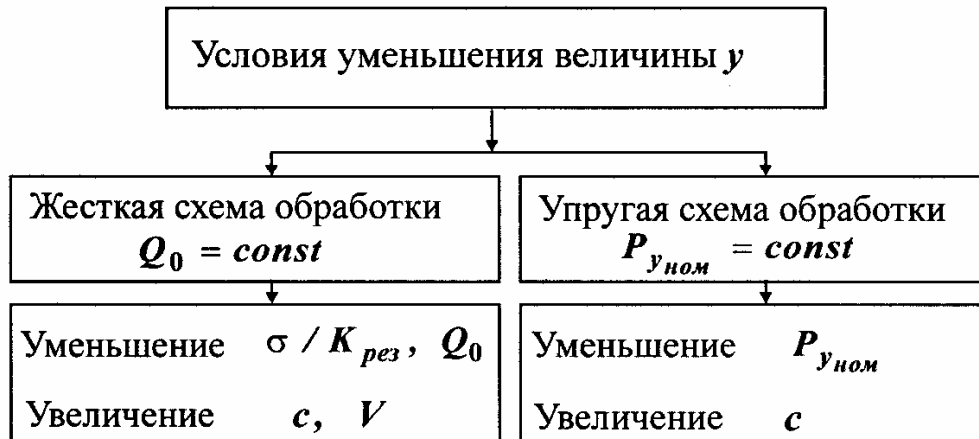


Рис. 4. Структурная схема условий уменьшения величины  $y$ .

Разрешая зависимость (16) относительно знаменателя и подставляя полученное выражение в зависимость (15), имеем

$$\Pi_{max} = y \cdot \frac{\Delta \Pi}{\Delta y} \quad (17)$$

или

$$\frac{\Pi_{max}}{y} = \frac{\Delta \Pi}{\Delta y}. \quad (18)$$

Характер изменения безразмерной величины  $\frac{\Pi_{max}}{y}$  с увеличением

безразмерной величины  $\frac{\Delta \Pi}{\Delta y}$  графически показан на рис. 5. Как видно, между величинами  $\frac{\Pi_{max}}{y}$  и  $\frac{\Delta \Pi}{\Delta y}$  существует линейная связь.

Разрешая зависимости (15) и (16), определим время процесса выхаживания  $\tau$

$$\tau = \frac{\sigma \cdot F}{c \cdot K_{рез} \cdot V} \cdot \left( \frac{\Delta \Pi}{\Delta y} - 1 \right). \quad (19)$$

Наряду с параметрами

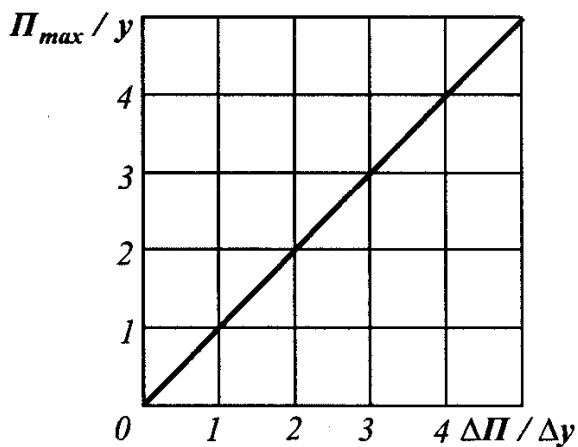


Рис. 5. Зависимость безразмерной величины  $\Pi_{max} / y$  от безразмерной величины  $\Delta \Pi / \Delta y$ .

$F, c, V, \frac{\sigma}{K_{рез}}$ , характеризующими процесс резания, зависимость (19) содержит

параметры точности обработки  $y$  и  $\Delta y$ . Чем больше отношение  $\frac{\Delta \Pi}{\Delta y}$ , тем продолжительнее должен быть процесс выхаживания с целью обеспечения требуемого параметра точности обработки  $\Delta y$ .

Проведем оптимизацию параметров процесса выхаживания. Для этого зависимость (15), аналогично зависимости (16), разрешим относительно времени обработки  $\tau$ :

$$\tau = \frac{\sigma \cdot F}{c \cdot K_{рез} \cdot V} \cdot \left( \frac{\Pi_{max} - y}{y} \right). \quad (20)$$

Создать начальный натяг в технологической системе, равный величине снимаемого припуска  $\Pi_{max}$  (особенно если припуск  $\Pi_{max}$  является относительно большой величиной), не всегда представляется возможным. В этом случае схема выхаживания практически нереализуема. Какой может быть выход из данной ситуации? Вполне очевидным решением может быть разбиение припуска  $(\Pi_{max} - y)$  на  $n$  частей и осуществление съема каждой части припуска, равной  $(\Pi_{max} - y)/n$ , по схеме выхаживания. Оценим суммарное время  $\tau$  съема припуска  $(\Pi_{max} - y)$  согласно предложенного решения.

Пусть время  $\tau_1$  съема части припуска величиной  $(\Pi_{max} - y)/n$  равно

$$\tau_1 = \frac{\sigma \cdot F}{c \cdot K_{рез} \cdot V} \cdot \left( \frac{\Pi_{max} - y}{n \cdot y} \right). \quad (21)$$

Тогда суммарное время  $\tau$  съема припуска величиной  $(\Pi_{max} - y)$  определится

$$\tau = n \cdot \tau_1 = \frac{\sigma \cdot F}{c \cdot K_{рез} \cdot V} \cdot \left( \frac{\Pi_{max} - y}{y} \right). \quad (22)$$

В итоге пришли к зависимости, идентичной зависимости (20). Следовательно, суммарное время обработки  $\tau$  не зависит от того, за какое количество этапов выхаживания производится съем общего припуска  $(\Pi_{max} - y)$ . Данный результат свидетельствует о том, что можно с одинаковой эффективностью производить съем как относительно больших, так и небольших по величине припусков.

Уточним полученное решение. В зависимость (20) входит переменная во времени величина – отношение  $K_{рез}/\sigma$ , определяющее режущую способность инструмента. Как известно, с течением времени обработки в связи с затуплением инструмента коэффициент резания  $K_{рез}$  уменьшается, а условное напряжение резания  $\sigma$  увеличивается. В результате отношение  $K_{рез}/\sigma$  уменьшается.

Оценим влияние уменьшения во времени данного отношения на величину  $\tau$ . Для этого представим отношение  $K_{рез}/\sigma$  в виде:

$$\frac{K_{рез}}{\sigma} = A \cdot \tau^{-z}, \quad (23)$$



где  $A, z$  - некоторые заданные величины;  $0 < z < 1,0$ .

Подставим зависимость (23) в зависимость (20):

$$\tau = \frac{F}{c \cdot V \cdot A} \cdot \left( \frac{\Pi_{max} - y}{y} \right)^{\frac{1}{1-z}}. \quad (24)$$

Общий припуск  $(\Pi_{max} - y)$  рассмотрим в виде  $(\Pi_{max} - y)/n$ . Тогда время  $\tau_1$  съема припуска величиной  $(\Pi_{max} - y)/n$ , исходя из зависимости (24), определится

$$\tau_1 = \frac{F}{c \cdot V \cdot A} \cdot \left( \frac{\Pi_{max} - y}{n \cdot y} \right)^{\frac{1}{1-z}}. \quad (25)$$

Суммарное время  $\tau$  съема припуска  $(\Pi_{max} - y)$  выразится

$$\tau = n \cdot \tau_1 = \frac{F}{c \cdot V \cdot A} \cdot \left( \frac{\Pi_{max} - y}{y} \right)^{\frac{1}{1-z}} \cdot \left( \frac{1}{n} \right)^{\frac{1}{1-z}}. \quad (26)$$

Как следует из зависимости (26), в данном случае время  $\tau$  зависит от количества этапов выхаживания  $n$ . С увеличением  $n$  время  $\tau$  уменьшается, т.е. эффективно съем общего припуска осуществлять за несколько этапов выхаживания (с относительно небольшими припусками).

Таблица

Расчетные значения показателя степени

$z$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,8
$\frac{z}{(1-z)}$	0	0,11	0,25	0,43	0,67	1,0	4,0

Как следует из таблицы, при значениях  $z < 0,5$  показатель степени  $\frac{z}{(1-z)}$ , с которым входит параметр  $n$  в зависимость (26), относительно небольшой и влияние  $n$  на время  $\tau$  не столь существенно. При  $z > 0,5$  влияние  $n$  на  $\tau$  весьма большое, т.к. показатель степени  $\frac{z}{(1-z)}$  при этом существенно увеличивается.

Таким образом, теоретически обосновано условие повышения производительности обработки по схеме выхаживания, состоящее в том, что съем припуска, осуществляется с периодическим созданием натяга в технологической системе, который по величине кратный общему снимаемому припуску  $(\Pi_{max} - y)$ . При этом с уменьшением натяга суммарное время обработки уменьшается.

По-видимому, этим фактором можно объяснить то, что на практике при абразивной обработке широко применяются схемы съема припуска за счет периодического создания натяга в технологической системе на величину, кратную снимаемому припуску. Например, при плоском шлифовании по жесткой схеме

периодически устанавливается определенная глубина шлифования, которая по физической сути определяет величину создаваемого натяга в технологической системе. Этот натяг в течении одного или двойного (прямого и обратного) продольных ходов стола станка удаляется в результате съема материала шлифовальным кругом. Иными словами, так называемая “жесткая схема плоского шлифования” с физической точки зрения является многоэтапной схемой выхаживания, осуществляемой в результате создания в технологической системе натяга, равного глубине шлифования. При этом в пределах каждого этапа (одного или двух проходов стола станка) не ставится задача обеспечить требуемое значение величины  $y$  (точности размера). Его обеспечивают на последнем этапе выхаживания.

Аналогичный характер съема припуска имеет место также при круглом наружном и внутреннем шлифовании с поперечной подачей и в других процессах абразивной обработки с дискретной радиальной (поперечной) подачей.

При обработке (шлифовании) с непрерывной радиальной подачей рассматриваемая многоэтапная схема выхаживания не реализуется. Реализуются схемы (согласно предложенной выше классификации) с увеличивающимися или постоянными во времени параметрами  $P_y$  и  $y$ .

Таким образом, проведенный анализ показал, что полученные теоретические решения относительно эффективности использования схемы выхаживания (выполняемой в один или большее число этапов) раскрывают физическую сущность применяемых на практике процессов абразивной обработки (шлифования) с дискретной радиальной подачей.

**Список литературы:** 1. Теоретические основы резания и шлифования материалов: Учеб. пособие / *А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков, Б.С. Серов, А.А. Якимов*. – Одесса: ОГПУ, 1999. – 450 с. 2. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общей редакцией *Ф.В. Новикова и А.В. Якимова*. В десяти томах. – Т. 1. “Механика резания материалов”. – Одесса: ОНПУ, 2002. – 580 с. 3. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общей редакцией *Ф.В. Новикова и А.В. Якимова*. В десяти томах. – Т. 3. “Резание материалов лезвийными инструментами”. – Одесса: ОНПУ, 2003. – 546 с. 4. *Фадеев В.А.* Математическое моделирование процесса формирования точности и шероховатости при финишной обработке. – Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве. – Труды 8-й Межд. научн.-техн. конф., 9-10 декабря 2003 г. – Харьков: ХНПК “ФЭД”, 2003. – С. 16-21. 5. *Маталин А.А.* Точность механической обработки и проектирование технологических процессов. – М.: Машиностроение, 1970. – 390 с. 6. *Балакшин Б.С.* Основы технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 1969. – 359 с. 7. *Якимов А.В., Свирицев В.И., Паршаков А.Н., Ларшин В.П.* Управление процессом шлифования. – К.: Техника, 1983. – 184 с. 8. *Новиков Г.В.* Задачи точности и производительности обработки в технологии машиностроения. – Авиационно-космическая техника и технология. Труды Гос. аэрокосмического ун-та им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”. Вып. 14, 2000. – С. 31-35. 9. Качество и производительность алмазно-абразивной обработки: учебное пособие / *А.В. Якимов, Ф.В.Новиков, Г.В.Новиков, А.А. Якимов* – Одесса: ОГПУ, 1999. – 212 с. 10. *Фадеев В.А.* Научный подход к выбору оптимальных способов и условий финишной обработки агрегатов авиационной техники. - Авиационно-космическая техника и технология. Труды Гос. аэрокосмического ун-та им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”. Вып. 14, 2000. – С. 36-40. 11. *Фадеев В.А., Новиков Ф.В.* Управление упругими перемещениями при финишной механической обработке. – Вісник НТУ “ХПІ”. Збірник наукових праць. Тем. випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2002. - № 19. – С. 153-159.