

*В.А. ФАДЕЕВ, канд. техн. наук, гл. инженер ГП ХМЗ «ФЭД»  
Ф.В.НОВИКОВ, докт. техн. наук, ХТ Эконом. Ун-т*

## **УПРАВЛЕНИЕ УПРУГИМИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯМИ ПРИ ФИНИШНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ**

У праці наведені теоретичні рішення по визначенню пружного переміщення продуктивності обробки. Подані шляхи ефективного керування пружними переміщеннями.

Наличие упругих перемещений при механической обработке кардинальным образом изменяет физическую сущность процесса и приводит к снижению производительности и точности обработки. По сути, вся история развития теории и практики финишной механической обработки связана с решением проблемы управления упругими перемещениями для обеспечения высоких показателей точности и производительности обработки.

Сложность решения проблемы состоит в том, что необходимо соединить механику деформирования элементов технологической системы с механикой процесса резания абразивными и лезвийными инструментами и на этой основе провести оптимизационные расчеты для разработки оптимальных схем и условий обработки.

В настоящее время проблема в полной мере не решена, так как отсутствуют общие математические решения. Имеющиеся частные решения получены в большинстве случаев опытным путем, а также с использованием эмпирических зависимостей.

В этом плане представляет интерес теоретический подход к решению задач точности и производительности в технологии машиностроения, учитывающий упругие перемещения в технологической системе, разработанный Новиковым Г.В. [1, 2, 3]. Впервые основы данного подхода были сформулированы им в кандидатской диссертации (защищенной в 1990 году в Одесском политехническом институте), которая посвящена проблеме алмазного шлифования деталей с недостаточно жестким креплением на станке [3]. Суть полученных решений сводится к тому, что при наличии упругих перемещений существует неустановившийся (переходной) процесс обработки, который по длительности соизмерим с продолжительностью обработки конкретной детали на станке. Поэтому, автором предложены пути «ухода» от переходного процесса, а также пути его рационального использования для повышения производительности и точности обработки.

Используя основные положения данного подхода, в настоящей статье решаются задачи обоснования и выбора наиболее эффективных способов финишной механической обработки высокоточных поверхностей агрегатов авиационной техники.

При решении задач с определенными допущениями будем рассматривать упругие перемещения лишь в радиальном направлении  $y$ , рис. 1. Уравнение равновесия от действия двух сил: радиальной составляющей силы резания  $P_y$  и упруго восстанавливающей силы  $c \cdot y$ , имеет вид:

$$c \cdot y = P_y, \quad (1)$$

где  $c$  - приведенная жесткость технологической системы, н/м;

$$P_y = \frac{P_z}{K_{рез}} = \frac{\sigma \cdot S}{K_{рез}} = \frac{\sigma \cdot v \cdot (a - y)}{K_{рез}}, \quad (2)$$

$P_z$  - тангенциальная составляющая силы резания, н;

$\sigma$  - условное напряжение резания, н/м<sup>2</sup>;

$K_{рез}$  - коэффициент резания;

$a, v$  - соответственно толщина и ширина среза, м.

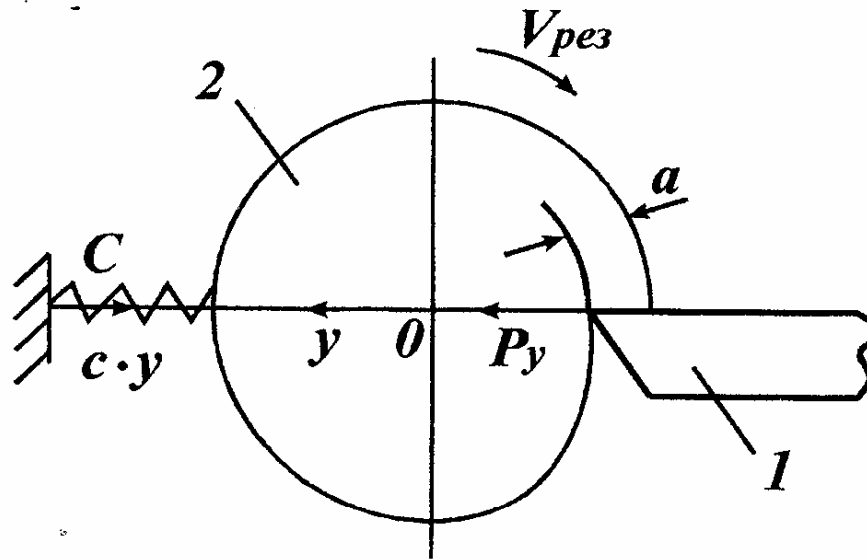


Рис.1. Расчетная схема:

1 – резец; 2 – деталь

Преобразуем уравнение (1) и разрешим его относительно величины  $y$ :

$$y = \frac{a}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{рез}}{\sigma \cdot v}\right)} = \frac{a}{(1 + A)} \quad (3)$$

Из зависимости (3) следует линейная связь между упругим перемещением  $y$  и толщиной среза  $a$ . Коэффициент  $\frac{1}{(1+A)}$  выполняет роль передаточной функции между параметрами  $y$  и  $a$ . По абсолютной величине он всегда меньше единицы, т.е. выполняется условие  $y < a$ . Уменьшить  $y$  можно увеличением параметра  $A$  за счет увеличения жесткости технологической системы  $c$ , соотношения  $\frac{K_{рез}}{\sigma}$  и уменьшения ширины среза  $\epsilon$  (рис. 2).

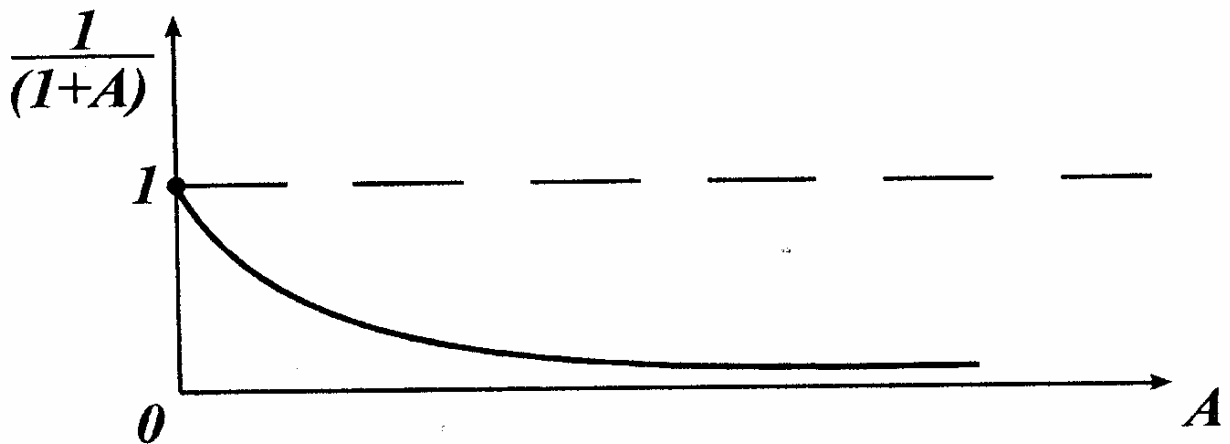


Рис.2. Зависимость  $\frac{1}{(1+A)}$  от  $A$

Однако уменьшение  $\epsilon$  связано с уменьшением производительности обработки, что не эффективно. Увеличение параметра  $c$  также ограничено. Следовательно, основным условием уменьшения упругого перемещения  $y$  (повышения точности обработки) является увеличение соотношения  $\frac{K_{рез}}{\sigma}$ , которое зависит от режущей способности инструмента. Чем острее инструмент и меньше его трение с обрабатываемым материалом, тем больше соотношение  $\frac{K_{рез}}{\sigma}$  и эффективнее процесс обработки. Однако, таким путем полностью исключить упругие перемещения (т.е. выполнить условие  $y = 0$ ), нельзя.

Исходя из уравнения (1), полностью исключить упругие перемещения ( $y = 0$ ) при резании можно, если уравновесить силу  $P_y$  дополнительно силой  $P_y' = P_y$ . Тогда уравнение (1) примет вид:

$$c \cdot y = P_y - P_y' ,$$

откуда  $y = 0$ . (4)

Вместе с тем, реализовать данное условие на практике достаточно сложно.

Из зависимости (2) следует, что величина  $(a - y)$ , равная фактической толщине среза, за счет упругого перемещения  $y$  меньше номинальной (заданной) толщины среза  $a$ . Это приводит к снижению производительности обработки. Для анализа путей увеличения фактической производительности уравнение (1) с учетом зависимости (2) представим в виде:

$$c \cdot y = \frac{\sigma \cdot v}{K_{рез}} \cdot a - \frac{\sigma \cdot v}{K_{рез}} \cdot y \quad (5)$$

Если приложить к детали дополнительную силу, равную  $\frac{\sigma \cdot v}{K_{рез}} \cdot y$  и направленную в сторону действия радиальной составляющей силы резания  $P_y$ , то уравнение (5) выразится:

$$c \cdot y = \frac{\sigma \cdot v}{K_{рез}} \cdot a - \frac{\sigma \cdot v}{K_{рез}} \cdot y + \frac{\sigma \cdot v}{K_{рез}} \cdot y$$

или  $c \cdot y = \frac{\sigma \cdot v}{K_{рез}} \cdot a \quad (6)$

В этом случае фактическая толщина среза равна номинальной толщине среза  $a$ , соответственно фактическая и номинальная производительности обработки равны.

Если приложить к детали дополнительную силу  $\frac{\sigma \cdot v}{K_{рез}} \cdot y_0$  (где  $y_0$  отличается от значения  $y$ ), то уравнение (5) примет вид:

$$c \cdot y = \frac{\sigma \cdot v}{K_{рез}} \cdot a - \frac{\sigma \cdot v}{K_{рез}} \cdot y + \frac{\sigma \cdot v}{K_{рез}} \cdot y_0$$

или  $c \cdot y = \frac{\sigma \cdot v}{K_{рез}} \cdot (a - y + y_0) \quad (7)$

При  $y = y_0$  приходим к прежнему решению, вытекающему из уравнения (6). При  $y_0 > y$  фактическая толщина среза, равная  $(a - y + y_0)$ , будет больше номинальной толщины среза  $a$ . При  $y_0 < y$ , наоборот, фактическая толщина среза меньше номинальной толщины среза  $a$ . Однако, в этом случае фактическая толщина среза больше, чем в случае

$y_0 = 0$ . Таким образом, создавая в технологической системе в начальный момент обработки натяг, можно существенно повысить производительность обработки. На практике данное условие реализовано, например, в круглошлифовальных станках, за счет создания ускоренного врезания круга в обрабатываемую деталь с целью создания начального натяга в технологической системе.

Упругое перемещение  $y$ , исходя из зависимости (7), выразится:

$$y = \frac{(a + y_0)}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{рез}}{\sigma \cdot b}\right)}. \quad (8)$$

Величина  $y$  тем больше, чем больше  $y_0$ . Как видим, увеличение производительности обработки (за счет увеличения  $y_0$ ) сопровождается увеличением величины  $y$  (ухудшением точности обработки). Следовательно, полученное решение (7) направлено на повышение производительности обработки и может быть использовано на операциях предварительной обработки, когда не требуется обеспечение высокой точности. На финишных операциях, где формируется точность, необходимо использовать другие технические решения. Для их обоснования предположим, что в начальный момент обработки в технологической системе в радиальном направлении создан натяг, равный по величине снимаемому припуску  $\Pi$ , и обработка производится без радиальной подачи (реализуется процесс выхаживания).

Представим уравнение (1) с учетом зависимости (2) в виде:

$$c \cdot (\Pi - \Delta) = \frac{\sigma}{K_{рез}} \cdot \frac{Q}{V_{рез}}, \quad (9)$$

где  $Q = S \cdot V_{рез}$  - производительность обработки, м<sup>3</sup>;  $V_{рез}$  - скорость резания, м/с;  $\Delta$  - линейный сьем материала, м.

При радиальном точении цилиндрической детали с учетом средней производительности обработки  $Q$  величина  $\Delta$  выразится:

$$\Delta = \frac{V_{объем}}{\pi \cdot D_{дет} \cdot b} = \frac{Q \cdot \tau}{\pi \cdot D_{дет} \cdot b}, \quad (10)$$

где  $V_{объем}$  - объем снятого материала за время  $\tau$ ;  $D_{дет}$  - диаметр детали, м;  $b$  - ширина резания, м.

Разрешая уравнение (9) с учетом зависимости (10) относительно  $Q$ , получим:

$$Q = \frac{\Pi}{\left( \frac{\tau}{\pi \cdot D_{дет} \cdot v} + \frac{\sigma}{c \cdot K_{рез} \cdot V_{рез}} \right)} \quad (11)$$

С течением времени обработки  $\tau$  производительность обработки  $Q$  непрерывно уменьшается. Наибольшее влияние на  $Q$  оказывает величина снимаемого припуска  $\Pi$ . Увеличить  $Q$  можно также уменьшением соотношения  $\frac{\sigma}{K_{рез}}$  и увеличением параметров  $c$ ,  $v$ ,  $V_{рез}$ ,  $D_{дет}$ .

Определим из уравнения (9) с учетом зависимости (11) величину упругого перемещения  $y = \Pi - \Delta$ :

$$y = \frac{\sigma}{c \cdot K_{рез} \cdot V_{рез}} \cdot \frac{\Pi}{\left( \frac{\tau}{\pi \cdot D_{дет} \cdot v} + \frac{\sigma}{c \cdot K_{рез} \cdot V_{рез}} \right)} =$$

$$= \frac{\Pi}{\left( 1 + \frac{\tau}{\pi \cdot D_{дет} \cdot v} \cdot \frac{c \cdot K_{рез} \cdot V_{рез}}{\sigma} \right)} \quad (12)$$

Аналогично производительности обработки  $Q$ , величина упругого перемещения  $y$  с течением времени обработки  $\tau$  уменьшается, что соответствует повышению точности обработки, рис. 3. Чем больше снимаемый припуск, тем длительнее процесс достижения заданной точности обработки (величины  $y$ ). Уменьшить  $y$ , исходя из зависимости (12), можно увеличением параметров  $c$ ,  $V_{рез}$ , соотношения  $\frac{K_{рез}}{\sigma}$  и уменьшением  $v$ .

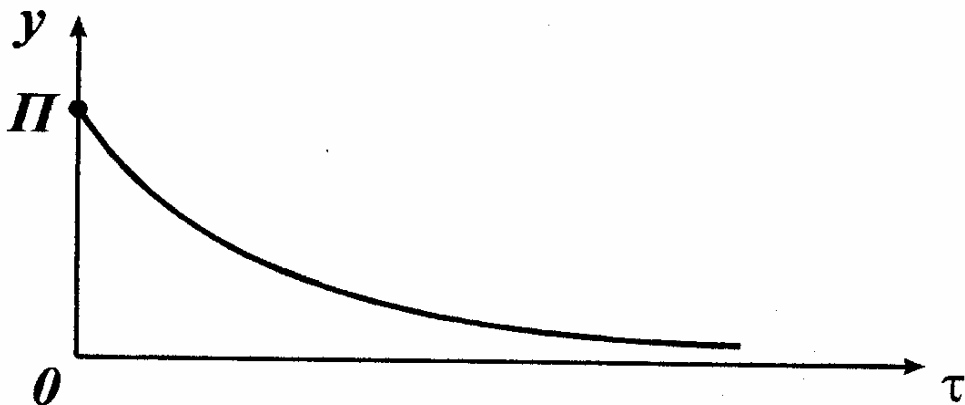


Рис.3. Зависимость  $y$  от  $\tau$

Полученное решение согласуется с аналогичными решениями, полученными Новиковым Г.В. [1, 2, 3], в которых уравнения типа (9)

решаются с учетом  $Q = \frac{dV_{объем}}{d\tau}$ . В результате приходим к

дифференциальному уравнению первого порядка. В нашем случае решение получено на основе приближенной зависимости  $Q = V_{объем} / \tau$ , что, несомненно, упрощает решение уравнения, не изменяя его физической сути.

В полученные зависимости входит важнейший показатель процесса резания  $\sigma / K_{рез}$ , от которого во многом зависит уровень значений  $Q$  и  $y$ .

Данный показатель определяет физику процесса резания. На его величину влияют геометрия режущей части инструмента, интенсивность трения инструмента с обрабатываемым инструментом (включая трение обрабатываемого материала со связкой алмазно-абразивного инструмента), степень затупления режущей кромки инструмента и т.д. Поэтому, для выработки окончательных решений необходимо знать функциональные связи соотношения  $\sigma / K_{рез}$  с указанными выше параметрами.

Зависимости (11) и (12) могут быть использованы для анализа процесса шлифования. В этом случае параметр  $V_{рез}$  необходимо рассматривать как скорость шлифовального круга  $V_{кр}$ , а параметр  $e = B$ , как ширину шлифования.

Таким образом, получены общие зависимости, позволяющие научно-обоснованно подойти к управлению упругими перемещениями при механической обработке ответственных деталей.

Список литературы: 1. Новиков Г.В. Задачи точности и производительности обработки в технологии машиностроения. – Авиационно-космическая техника и технология. Труды Государственного аэрокосмического университета им. Н.Е. «ХАИ». Выпуск 14. – Харьков: «ХАИ», 2000. – с. 31-35. 2. Новиков Г.В. Повышение точности и производительности механической обработки. – Вісник Інженерної Академії України. – К., Спец. випуск, 2000. – с. 112-115. 3. Новиков Г.В. Повышение эффективности алмазно-искрового шлифования деталей с высокопрочными покрытиями. – Дис. ... канд. техн. наук. – Харьков, 1989. – 210 с. 4. Теоретические основы резания и шлифования материалов: Учебн. пособие / А.В.Якимов, Ф.В.Новиков, Г.В.Новиков и др. –Одесса, ОГПУ, 1999. – 450 с. 5. Фадеев В.А. Научный подход к выбору оптимальных способов и условий финишной обработки агрегатов авиационной техники. – Авиационно-космическая техника и технология. Труды Государственного аэрокосмического университета им. Н.Е. «ХАИ». Выпуск 14. – Харьков: «ХАИ», 2000. – с. 36-40.