

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

**Новиков Г.В.**, канд. техн. наук (НТК “Эльбор”, г. Харьков)

**Дитиненко С.А.**, канд. техн. наук

(Харьковский национальный экономический университет им. Семена Кузнеця)

Задачи повышения точности и производительности механической обработки являются важными для технологии машиностроения. В работах [1-5] предложен теоретический подход к решению данных задач. Аналитически установлено, что с течением времени обработки по схеме выхаживания можно уменьшить упругие перемещения в технологической системе практически до нуля и приблизиться к идеальной точности обрабатываемой поверхности. Однако, реализовать это условие затруднено, что связано с высокой силовой напряженностью процесса резания при абразивной обработке. Поэтому целью работы является определение условий повышения точности и производительности механической обработки на основе исследований силовой напряженности процесса механической обработки.

В работе [5] получены аналитические зависимости для определения производительности обработки  $Q$  и величины упругого перемещения  $y$  в технологической системе при абразивной обработке по схеме выхаживания:

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

$$y = \frac{\Pi}{\left( 1 + \frac{\tau}{\pi \cdot D_{дет} \cdot v} \cdot \frac{c \cdot K_{рез} \cdot V}{\sigma} \right)}, \quad (2)$$

где  $\Pi$  – величина снимаемого припуска, м;  $\tau$  – время обработки, с;  $v$  – ширина резания, м;  $D_{дет}$  – диаметр обрабатываемой детали, м;  $V$  – скорость резания, м/с;  $c$  – жесткость технологической системы, Н/м;  $\sigma$  – 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.

Отношение  $K_{рез} / \sigma$  определяется зависимостью [5]:

$$\frac{K_{рез}}{\sigma} = \frac{1}{3} \cdot \sqrt[3]{\frac{2}{HV^2 \cdot \tau_{сдв}} \cdot \left( \frac{a_z}{\rho} \right)^2}, \quad (3)$$

где  $HV$ ,  $\tau_{сдв}$  – соответственно твердость (по Виккерсу) и предел прочности на сдвиг обрабатываемого металла, Н/м<sup>2</sup>;  $a_z$  – толщина среза при абразивной обработке, м;  $\rho$  – радиус округления режущей кромки инструмента, м.

В зависимость (3) входит известная величина  $a_z / \rho$ , определяющая условия перехода от упруго-пластического деформирования обрабатываемого металла к процессу резания. Процесс стружкообразования (процесс резания) начинается при  $a_z / \rho \geq 0,04$  (по данным проф. Богомолова Н.И.). При меньших значениях  $a_z / \rho$  происходит лишь упруго-пластическое деформирование обрабатываемого металла без образования стружки.

Первоначально рассмотрим процесс выхаживания, реализуемый при радиальном точении. Выразим производительность обработки  $Q$  в виде  $Q = a \cdot v \cdot V$ , где  $a = a_z$  – толщина среза, м;  $v$  – ширина среза, м;  $V$  – скорость резания, м/с. Тогда зависимость (1), с учетом зависимости (3), примет вид:

$$\frac{\tau}{\pi \cdot D_{\text{дет}} \cdot v} \cdot Q + \frac{3}{c \cdot V} \cdot \sqrt[3]{HV^2 \cdot \tau_{\text{сдв}} (\rho \cdot v \cdot V)^2} \cdot Q^{\frac{1}{3}} - \Pi = 0. \quad (4)$$

В результате пришли к трансцендентному уравнению, относительно неизвестной величины  $Q$ . Решить данное уравнение можно лишь численным методом, задавая вполне конкретные значения всех входящих в уравнение величин и подбором определяя искомое значение  $Q$ . Однако, таким образом можно получить частные решения. Для того, чтобы получить общее решение, разрешим уравнение (4) относительно времени обработки  $\tau$ :

$$\tau = \frac{1}{Q^{\frac{2}{3}}} \cdot \left[ \frac{\pi \cdot D_{\text{дет}} \cdot v \cdot \Pi}{Q^{\frac{1}{3}}} - \frac{3}{c \cdot V} \cdot \sqrt[3]{HV^2 \tau_{\text{сдв}} \cdot (\rho \cdot v \cdot V)^2} \right]. \quad (5)$$

В результате пришли к аналитической зависимости, связывающей между собой две переменные величины  $\tau$  и  $Q$ . Нетрудно видеть, что с увеличением производительности обработки  $Q$  время обработки  $\tau$  непрерывно уменьшается, рис. 1,а. Из этого можно сделать вывод: с увеличением времени обработки  $\tau$  при выхаживании (т.е. с течением времени обработки) производительность обработки  $Q$  уменьшается. Следовательно, уменьшается и толщина среза

$a = \frac{Q}{v \cdot V}$  (рис. 1,б).

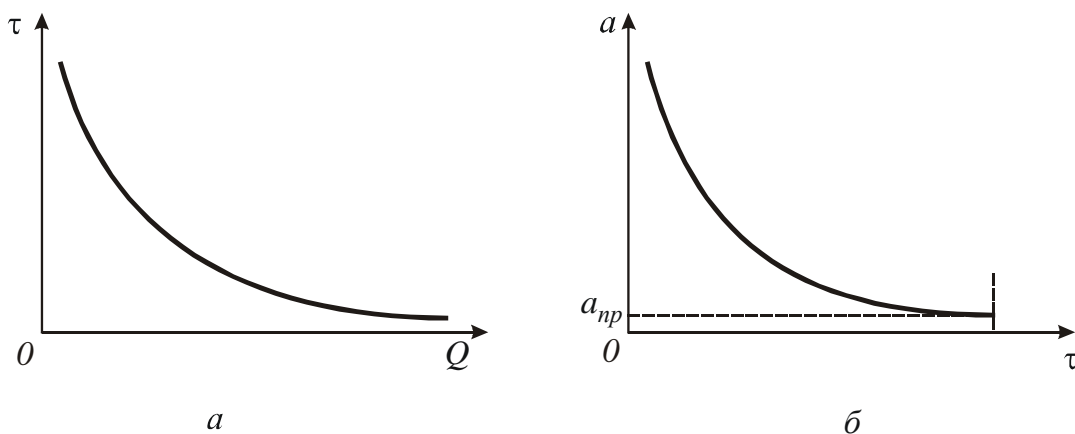


Рис. 1. Зависимости  $\tau$  от  $Q$  (а) и  $a$  от  $\tau$  (б)

Однако, как отмечалось ранее, существуют предельные значения отношения  $a_z / \rho \geq 0,04$ , ниже которых процесс резания (стружкообразования) неосуществим. Следовательно, должны существовать предельные значения толщины среза  $a_{np}$  (для заданных значений радиуса округления режущей кромки инструмента  $\rho$ ), т.е.  $a_{np} = 4 \cdot \rho$ .

Учитывая важность данных результатов, получим аналитическое решение уравнения (4), принимая с определенными допущениями во втором слагаемом вместо  $Q^{1/3}$  величину  $Q^{1/2}$ . В результате получено квадратное уравнение:

$$M \cdot Q + N \cdot Q^{\frac{1}{2}} - \Pi = 0 \quad \text{или} \\ x^2 + \frac{N}{M} \cdot x - \frac{\Pi}{M} = 0, \quad (6)$$

где  $x^2 = Q$ ;  $M = \frac{\tau}{\pi \cdot D_{дет} \cdot v}$ ;  $N = \frac{3}{c \cdot V} \cdot \sqrt[3]{HV^2 \cdot \tau_{сдв} \cdot (\rho \cdot v \cdot V)^2}$ .

Его решение:

$$Q = \frac{1}{\sqrt{\left( \frac{N}{2 \cdot \Pi} + \sqrt{\frac{N^2}{4 \cdot \Pi^2} + \frac{M}{\Pi}} \right)}}. \quad (7)$$

С увеличением времени обработки  $\tau$  (с увеличением параметра  $M$ ) производительность обработки  $Q$  уменьшается. Уменьшаются также толщина среза  $a = \frac{Q}{v \cdot V}$ , отношения  $a / \rho$  и  $K_{рез} / \sigma$ . При этом толщина среза  $a$  и отношение  $K_{рез} / \sigma$  описываются зависимостями:

$$a = \frac{1}{v \cdot V \cdot \sqrt{\left( \frac{N}{2 \cdot \Pi} + \sqrt{\frac{N^2}{4 \cdot \Pi^2} + \frac{M}{\Pi}} \right)}}; \quad (8)$$

$$\frac{K_{рез}}{\sigma} = \frac{1}{3} \cdot \sqrt{\frac{2}{HV^2 \cdot \tau_{сдв}} \cdot \frac{1}{v^2 \cdot V^2 \cdot \rho^2 \left( \frac{N}{2 \cdot \Pi} + \sqrt{\frac{N^2}{4 \cdot \Pi^2} + \frac{M}{\Pi}} \right)}}. \quad (9)$$

Если подставить зависимость (9) в зависимость (2), то видим, что с течением времени обработки  $\tau$  величина упругого перемещения  $y$  уменьшается. Следовательно, характер изменения отношения  $K_{рез} / \sigma$  с течением времени обработки  $\tau$  не вносит принципиальных изменений в закономерности изменения величины  $y$ . Вместе с тем, с уменьшением толщины среза  $a$  уменьшается отношение  $a / \rho$ . При уменьшении  $a / \rho$  до значения 0,04, процесс резания прекратится, что не позволит выполнить условие  $y \rightarrow 0$ , согласно зависимости

(2). Из этого следует, что основным препятствием достижения высокой точности обработки является уменьшение отношения  $a/\rho$  ниже предельного значения, при котором процесс резания прекращается и сьем металла не происходит.

Поэтому важнейшим условием повышения точности и производительности обработки необходимо рассматривать увеличение отношения  $a/\rho$ . Так как толщина среза  $a$  с течением времени обработки непрерывно уменьшается, увеличить отношение  $a/\rho$  можно путем уменьшения радиуса округления режущей кромки инструмента  $\rho$ . Для этого необходимо применять инструментальные материалы, обеспечивающие высокую остроту режущей кромки и характеризующиеся высокой износостойкостью. В первую очередь, широко применяемые на практике, синтетические сверхтвердые материалы (синтетические алмазы и т.д.).

В процессе обработки необходимо, чтобы выполнялось условие  $a/\rho \geq 0,04$  при уменьшении величины упругого перемещения  $y$  до значения предельной толщины среза, равного  $a_{np} = 0,04 \cdot \rho$  (т.е. на протяжении всего времени обработки). Поэтому установим время обработки  $\tau$ , за которое величина упругого перемещения  $y$  уменьшится до значения предельной толщины среза  $a_{np} = 0,04 \cdot \rho$ . Для этого в зависимость (2) подставим зависимость (3) с учетом  $y = a_{np} = a$  и  $a_{np} = 0,04 \cdot \rho$ . Тогда

$$\tau = \frac{2 \cdot \pi \cdot D_{дет} \cdot v}{c \cdot V} \cdot \sqrt[3]{HV^2 \cdot \tau_{сдв}} \cdot \left( \frac{\Pi}{a} - 1 \right) \quad (10)$$

или

$$\tau = \frac{2 \cdot \pi \cdot D_{дет} \cdot v}{c \cdot V} \cdot \sqrt[3]{HV^2 \cdot \tau_{сдв}} \cdot \left( \frac{\Pi}{0,04 \cdot \rho} - 1 \right). \quad (11)$$

Из приведенных зависимостей следует, что время обработки  $\tau$  тем меньше, чем меньше параметры  $D_{дет}$ ,  $v$ ,  $HV$ ,  $\tau_{сдв}$ ,  $\Pi$  и больше параметры  $c$ ,  $V$  и  $a$  (или  $\rho$ ). За данное время  $\tau$ , при выполнении условия  $\frac{a}{\rho} = \frac{y}{\rho} \geq 0,04$ , величину упругого перемещения  $y$  можно уменьшить до значения  $y = 0,04 \cdot \rho$ . Если в качестве радиуса округления режущей кромки инструмента  $\rho$  рассматривать радиус абразивного или алмазного режущего зерна  $R$  при абразивной или алмазно-абразивной обработке, то по формуле  $y = 0,04 \cdot R$  можно рассчитать величину  $y$  в зависимости от зернистости  $\bar{X} = 2 \cdot R$  абразивного или алмазного порошка. В таблице приведены расчетные значения величины  $y$ .

Таблица

Расчетные значения величины  $y$

$\bar{X}$ , мкм	5	10	20	40	80
$y$ , мкм	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6

Из зависимостей (8) и (11) следует, что с течением времени обработки  $\tau$  величины  $a$  и  $y$  непрерывно уменьшаются, однако, с разной интенсивностью. Так, интенсивность уменьшения величины  $y$  выше интенсивности уменьшения толщины среза  $a$ . Этим и объясняется возможность уменьшения величины  $y$  в процессе обработки вплоть до нуля.

По физической сущности параметр  $a$  при абразивной обработке определяет максимальную высоту микронеровностей на обрабатываемой поверхности или параметр шероховатости обработки  $R_{max}$ . Из этого следует, что с течением времени обработки параметр  $R_{max}$  должен уменьшаться, причем с меньшей интенсивностью, чем величина упругого перемещения  $y$ . Это хорошо согласуется с многочисленными экспериментальными данными, согласно которым параметры шероховатости обработки  $R_{max}$  и  $R_a$  с течением времени обработки уменьшаются, однако не достаточно интенсивно. Например, установлено, что в процессе выхаживания (при шлифовании) происходит довольно интенсивный сьем удаленного металла (уменьшается величина  $y$ ) во времени, тогда как параметр шероховатости обработки  $R_{max}$  уменьшается не существенно, а через определенное время обработки становится практически постоянным.

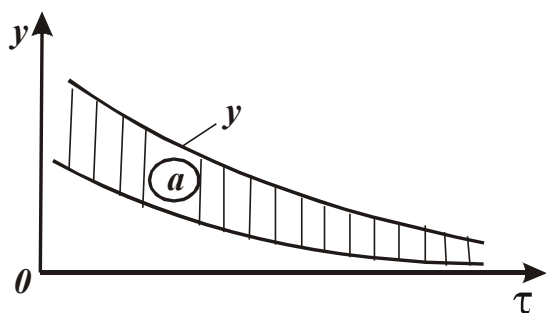


Рис. 2. Зависимость  $y$  от  $\tau$

Следовательно, при нормальном протекании процесса обработки величина  $y$  стремится принять значение, равное толщине среза  $a$ , что равносильно параметру шероховатости обработки  $R_{max}$ , т.е. по сути, процесс выхаживания должен обеспечить равенство значений параметров  $y$  и  $R_{max}$ . Если процесс резания (по

причине невыполнения условия  $a_z / \rho \geq 0,04$ ) прекратится раньше, то справедливо неравенство  $y > R_{max}$ . На рис. 2 показан характер изменения параметров  $y$  и  $a = R_{max}$  с течением времени обработки (заштрихованным показана величина  $a$ ). Таким образом, установлено, что в конечном итоге величина упругого перемещения  $y$  и параметр шероховатости обработки  $R_{max}$  определяются из условия  $a_z / \rho = 0,04$ , рассматривая  $a = R_{max} = y$ . Уменьшить значение  $a = R_{max} = y$  можно двумя путями: уменьшением радиуса округления режущей кромки  $\rho$  и предельного значения  $a_z / \rho$ , при котором возможен процесс стружкообразования (процесс резания) (рис. 3).

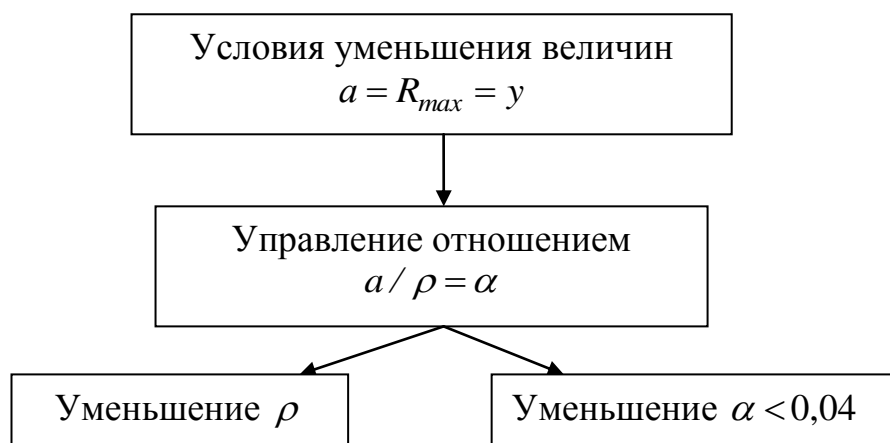


Рис. 3. Условия уменьшения величин  $a = R_{max} = y$

В первом случае необходимо использовать методы, обеспечивающие непрерывное микроразрушение режущих кромок абразивных или алмазных зерен в процессе обработки, исключая затупление зерен. Во втором случае необходимо использовать методы обработки, позволяющие уменьшить предельное значение  $a_z / \rho$ , при котором возможен процесс резания, т.е. методы обработки, расширяющие границы осуществления процесса резания.

**Список литературы:** 1. Новиков Г.В. Повышение эффективности алмазно-искрового шлифования деталей с высокопрочными покрытиями: Дис...канд. техн. наук: 05.02.08. – Харьков, 1989. – 210 с. 2. Теоретические основы резания и шлифования материалов: Учеб. пособие / Якимов А.В., Новиков Ф.В., Новиков Г.В., Серов Б.С., Якимов А.А. – Одесса: ОГПУ, 1999. – 450 с. 3. 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. 4. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 7. "Точность обработки деталей машин" – Одесса: ОНПУ, 2004. – 546 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. 10. "Концепции развития технологии машиностроения" – Одесса: ОНПУ, 2005. – 565 с.