

*А. Ф. РАБ*, канд. техн. наук,  
*Ф. В. НОВИКОВ*

## **ПРЕДЕЛЬНАЯ КИНЕМАТИЧЕСКАЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ПРОЦЕССА ШЛИФОВАНИЯ**

Сравнительная оценка по литературным данным производительности процесса различных видов шлифования инструментами из СТМ в значительной мере затруднена несопоставимостью условий выполнения исследований. Во многих литературных источниках зачастую отсутствуют условия проведения опытов, что делает невозможным сопоставление результатов по производительности. В особой мере это относится к сравнению данных производительности, выраженных в объемных ( $\text{мм}^3/\text{мин}$ ), весовых ( $\text{г}/\text{мин}$ ) или линейных ( $\text{мм}/\text{мин}$ ) величинах съема. Сопоставление производительности чрезвычайно важно при анализе долевого вклада составляющих шлифования инструментами из СТМ с введением в зону резания электрической энергии.

Составляющие комбинированных процессов шлифования – механическая, электрохимическое растворение, эрозионная, электроконтактная – сами по себе в чистом виде существенно различаются по производительности, особенно если сравнение производить в объемных показателях. Как отмечалось нами в работе [1], выигрыш в производительности электрофизических методов обусловлен в основном возможностью одновременной обработки очень больших поверхностей, просто неприемлемых для обычных процессов шлифования. Линейная скорость удаления припусков электрофизическими методами не превышает, как правило, доли  $\text{мм}/\text{мин}$ , в то же время комбинирование различных процессов позволяет на порядок повысить скорость линейного съема. Такая интенсивность удаления припуска не является предельной и ограничивается появлением ряда неблагоприятных явлений, в том числе высокого удельного расхода алмазов, что ликвидирует эффект высокой производительности.

В статье излагаются результаты аналитических расчетов предельной производительности, обусловленной кинематическими возможностями различных схем шлифования кругами из СТМ. Такие данные позволяют научно обоснованно раскрыть физическую природу факторов и явлений, ограничивающих достижение теоретического уровня интенсивности съема припуска.

Под линейной скоростью съема припуска будем понимать скорость относительного перемещения круга и изделия в направлении, нормальном к рабочей поверхности круга. Для ее определения можно использовать методику вывода кинематических соотношений, изложенную в статье [2].

Эта методика основана на соблюдении равенства скоростей съема припуска и внедрения обрабатываемого изделия в направлении, нормальном к рабочей поверхности круга. При этом полный съем внедряемого материала изделия должен производиться на заданном уровне выступания вершин зерен, не контактируя со связкой круга. Несоблюдение этого условия будет приводить к нарушению нормального процесса шлифования.

Предложенная методика определения предельной линейной скорости съема припуска позволяет свести все многообразие существующих схем шлифования к единой расчетной схеме, где главное перемещение круга и изделия осуществляется по нормали к рабочей поверхности круга.

Нормальное направление геометрически связано с остальными направлениями перемещения круга и изделия в различных видах шлифования и поэтому для любой схемы шлифования можно выделить составляющую скорости  $V'_{изд}$  взаимного перемещения круга и изделия в направлении, нормальном к рабочей поверхности круга (рис. 1,а).

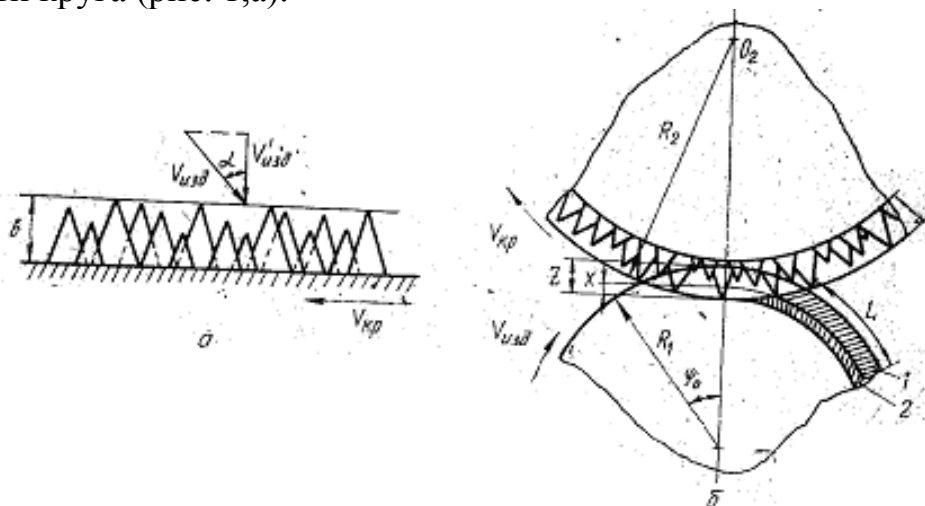


Рис. 1. Схемы расчета линейной (а) и удельной (б) производительности процесса продольного шлифования: 1 – слой полностью снятого металла изделия; 2 – слой остаточных микронеровностей.

Следовательно, многообразие схем шлифования кинематически можно свести к изменению угла входа изделия в рабочую поверхность круга.

Предельная нормальная линейная скорость внедрения изделия в рабочую поверхность круга определяется для всех схем шлифования по единой формуле

$$[2]: V'_{изд} = \frac{tg\gamma \cdot k \cdot V_{кр} \cdot b^2}{9} \text{ поэтому она зависит только от характеристики рабо-}$$

чей поверхности круга и скорости шлифования и одинакова для всех схем шлифования. Расчет  $V'_{изд}$ , выполненный для конкретных значений параметров  $2\gamma = 90^0$ ;  $k = 10^3$  шт/см<sup>2</sup>;  $b = 10$  мкм;  $V_{кр} = 30$  м/с, показывает, что  $V'_{изд} = 180$  мм/мин и в 6 раз превосходит экспериментальные данные [1]. Следовательно, кинематические возможности круга используются не в полной мере.

Линейная скорость внедрения изделия в круг может служить критерием оценки кинематической работоспособности рабочей поверхности круга, однако не позволяет установить наиболее производительную схему шлифования.

Такая задача может быть разрешена на основе анализа удельной производительности различных схем шлифования, которая выражает объем снятого обрабатываемого материала в единицу времени кругом единичной ширины. Как было показано в работе [2], определение предельной кинематической производительности можно свести к трем принципиальным расчетным схемам, отра-

жающим специфику продольного (рис. 1,б), врезного и тангенциального шлифования (рис. 2).

Примем следующие допущения.

1. Продольная подача принимается равной ширине круга, т.е. съем припуска производится только по “свежему” металлу.

2. При определении производительности не учитывается слой не полностью снятого материала микронеровностей вследствие их незначительного влияния.

Удельная производительность съема припуска выражается зависимостью

$$Q = \frac{L \cdot (z - H)}{t} = V_{изд} \cdot (z - H), \quad (1)$$

где  $L = V_{изд} \cdot t$  – текущее значение длины обработанной поверхности;  $z$  – расчетная глубина шлифования;  $H$  – остаточная шероховатость обработанной поверхности.

Величину  $H$  определим из формулы относительной полноты профиля круга [2]:

$$\varepsilon(y) = 1 - e^{-\frac{tg\gamma \cdot k \cdot V_{кр} \cdot t}{3 \cdot z \cdot b} (z-y)^3}. \quad (2)$$

Предельное значение  $H$  найдем из условия  $\varepsilon(y) = 0,95$ . Логарифмируя (2) и производя преобразования с учетом зависимостей

$$t = \frac{L}{V_{изд}}, \quad L = R_1 \cdot 2 \cdot \varphi_0, \quad \varphi_0 \cong \sqrt{\frac{2 \cdot R_2 \cdot z}{R_1 \cdot (R_1 + R_2)}},$$

получаем

$$H = \sqrt[3]{\frac{9 \cdot b \cdot \sqrt{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} \cdot \sqrt{z} \cdot V_{изд}}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot tg\gamma \cdot k \cdot V_{кр}}}. \quad (3)$$

Подставив уравнение (3) в (1), запишем

$$Q = V_{изд} \cdot \left( z - \frac{9 \cdot b \cdot \sqrt{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} \cdot \sqrt{z} \cdot V_{изд}}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot tg\gamma \cdot k \cdot V_{кр}} \right). \quad (4)$$

Выражение, входящее в формулу (4), определим для двух случаев  $z < b$ ,  $z > b$ .

Для  $z < b$  значение  $V_{изд}$  найдем из условия экстремума функции  $Q$ :  $Q'_{V_{изд}} = 0$ ,

$$V_{изд_{max}} = \left(\frac{3}{4}\right)^3 \cdot z^{5/2} \cdot \frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot tg\gamma \cdot k \cdot V_{кр}}{9 \cdot b \cdot \sqrt{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}}. \quad (5)$$

Подставив это уравнение в (4), получим

$$Q_{max} = \left(\frac{3}{4}\right)^3 \cdot z^{7/2} \cdot \frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot k \cdot V_{кр}}{36 \cdot b \cdot \sqrt{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}} \quad (6)$$

Для  $z > b$  воспользуемся ранее выведенным уравнением  $V_{изд}$ , полученным из условия отсутствия контакта изделия со связкой круга [2], принимая вместо  $z$  величину  $(z - b)$ , учитывающую изменение начальной координаты отсчета глубины резания  $z$ :

$$V_{изд} = \frac{\operatorname{tg} \gamma \cdot k \cdot b^2 \cdot V_{кр}}{9 \cdot \sqrt{2 \cdot (z - b)} \cdot \sqrt{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}} \quad (7)$$

Преобразовав уравнение (4) с помощью (7), определим предельную производительность для  $z > b$ :

$$Q = \frac{\operatorname{tg} \gamma \cdot k \cdot b^2 \cdot V_{кр}}{9 \cdot \sqrt{2 \cdot (z - b)} \cdot \sqrt{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}} \left( z - \sqrt{\frac{b^2 \cdot \sqrt{z}}{4 \cdot \sqrt{(z - b)}}} \right) \quad (8)$$

Для упрощения выражения (8) примем допущения  $z - b \approx z$ ,  $z > \sqrt[3]{\frac{b^3}{4}}$  тогда

$$Q = \frac{\operatorname{tg} \gamma \cdot k \cdot b^2 \cdot V_{кр}}{9 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}} \cdot \sqrt{z} \quad (9)$$

Расчетная схема врезного шлифования представлена на рис. 2.

Примем следующее допущение:

1. Расчет удельной производительности производится без учета шероховатости обработанной поверхности.

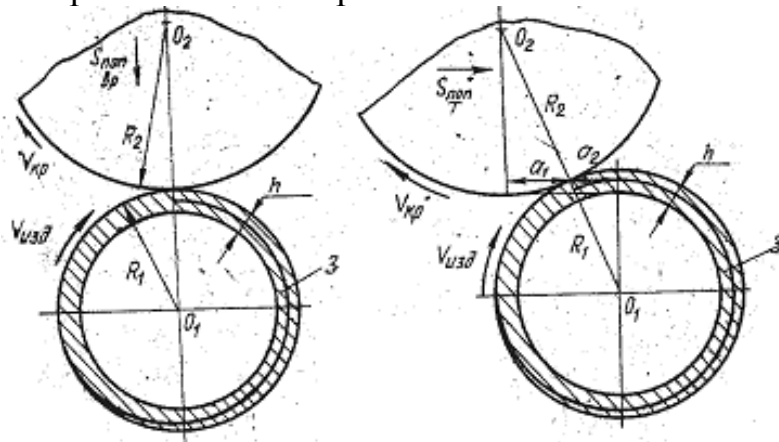


Рис. 2. Схема расчета удельной производительности врезного и тангенциального видов шлифования: 3 – снимаемый припуск.

Удельная производительность съема припуска определяется количеством снятого металла за цикл обработки, включающий врезание, установившийся процесс шлифования и выхаживания:

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{\pi \cdot R_1^2 - \pi \cdot (R_1 - h)^2}{t}, \quad (10)$$

где

$$t = \frac{h}{S_{non}} + \frac{2 \cdot \pi \cdot (R_1 - h)}{V_{изд}}. \quad (11)$$

Из формулы (19) [2] выразим  $S_{non}$  и подставим в (11):

$$t = \frac{h}{A} \cdot V_{изд} + \frac{2 \cdot \pi \cdot (R_1 - h)}{V_{изд}}, \quad (12)$$

где  $A = \frac{tg^2 \gamma \cdot k^2 \cdot b^4 \cdot V_{кр}^2}{324 \cdot \pi \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)}$ .

Определим  $t_{min}$  из условий экстремума функции (12):

$$t'_{V_{изд}} = 0; \quad t'_{V_{изд}} = \frac{h}{A} + \frac{2 \cdot \pi \cdot (R_1 - h)}{V_{изд}^2} = 0,$$

откуда

$$V_{изд_{opt}} = \sqrt{\frac{A}{h} \cdot 2 \cdot \pi \cdot (R_1 - h)}. \quad (13)$$

Подставив уравнение (13) в (12), получим

$$\begin{aligned} t_{min} &= \frac{h}{A} \cdot \sqrt{\frac{A}{h} \cdot 2 \cdot \pi \cdot (R_1 - h)} + \frac{2 \cdot \pi \cdot (R_1 - h)}{\sqrt{\frac{A}{h} \cdot 2 \cdot \pi \cdot (R_1 - h)}} = \\ &= \sqrt{\frac{A}{h} \cdot 2 \cdot \pi \cdot (R_1 - h)} + \sqrt{\frac{A}{h} \cdot 2 \cdot \pi \cdot (R_1 - h)}. \end{aligned} \quad (14)$$

Из выражения (14) следует, что оптимальный цикл осуществляется за два оборота изделия. Причем, за первый оборот происходит врезание, а за второй – выхаживание. Подставив (14) в (10), получим уравнение для максимальной удельной производительности врезного шлифования

$$Q = \frac{1}{18 \cdot \sqrt{2}} \cdot \frac{tg \gamma \cdot k \cdot b^2 \cdot V_{кр}}{\sqrt{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}} \cdot \sqrt{h}. \quad (15)$$

Согласно расчетной схеме тангенциального шлифования для  $z > b$  (рис. 2) полный съем припуска  $h$  производится за цикл, включающий взаимное перемещение круга и изделия до расположения их осей в вертикальной плоскости и выхаживание за один оборот изделия. Установим основные кинематические соотношения параметров процесса шлифования из условия полного среза обрабатываемого металла на уровне связки по ранее изложенной методике [2].

Для этого приведем  $S_{nonT}$  к  $S_{nonep}$ , т.е. тангенциальное шлифование к врезно-му:

$$S_{nonep} = \frac{h}{t}, \quad (16)$$

где  $t = \frac{a_1 + a_2}{S_{nonT}}$ ;  $S_{nonep} = \frac{h}{a_1 + a_2} \cdot S_{nonT}$ .

После подстановки уравнения (16) в (19) [2] и преобразований с учетом  $h \ll (R_1 - h)$  получим

$$V_{изд} = \frac{tg^2 \gamma \cdot k^2 \cdot b^4 \cdot V_{кр} \cdot (a_1 + a_2)}{324 \cdot \pi \cdot S_{nonT} \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \cdot h}. \quad (17)$$

Удельную производительность съема припуска определим по формуле (10), но  $t$  выразив в виде

$$t = \frac{a_1 + a_2}{S_{nonT}} + \frac{2 \cdot \pi \cdot (R_1 - h)}{V_{изд}}, \quad (18)$$

$t_{min}$  определим из условия экстремума функции (18)  $t'_{V_{изд}} = 0$ . После преобразований получим

$$t_{min} = \frac{18 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{R_1 \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)} \cdot \pi \cdot \sqrt{h}}{tg \gamma \cdot k \cdot V_{кр} \cdot b^2} + \frac{18 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{R_1 \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)} \cdot \pi \cdot \sqrt{h}}{tg \gamma \cdot k \cdot V_{кр} \cdot b^2}. \quad (19)$$

В выражении (19), как и в (14), первое и второе слагаемые равны между собой, что означает одинаковую продолжительность врезания и выхаживания.

Подставив уравнение (19) в (10), получим выражение максимальной удельной производительности тангенциального шлифования

$$Q = \frac{1}{18 \cdot \sqrt{2}} \cdot \frac{tg \gamma \cdot k \cdot b^2 \cdot V_{кр} \cdot \sqrt{h}}{\sqrt{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}}. \quad (20)$$

Формулы (9), (15), (20) устанавливают зависимость  $Q$  от основных параметров круга, изделия и режимов резания при  $h > b$ .

Как следует из формул, основные параметры одинаково влияют на  $Q$  для всех схем шлифования. Количественные значения  $Q$  при одинаковых основных параметрах отличаются между собой только постоянными числовыми коэффициентами, характеризующими кинематические особенности различных схем шлифования. Так, кинематическая производительность врезного и тангенциального шлифования в два раза ниже продольного шлифования, что обусловлено необходимостью второго оборота изделия для осуществления процесса выхаживания. Таким образом, предельная кинематическая производительность процесса шлифования не зависит от схемы взаимного перемещения круга и изделия.

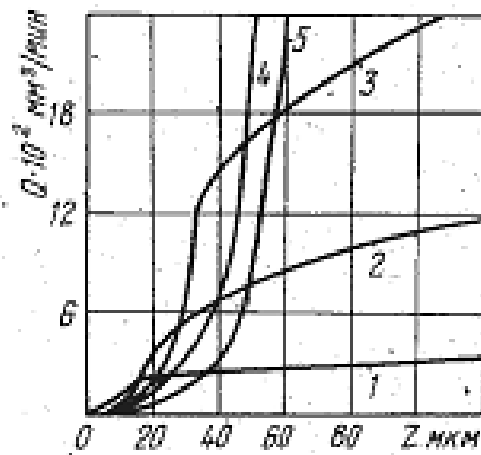


Рис. 3. Зависимость предельной кинематической удельной производительности продольного шлифования  $Q$  от глубины резания  $Z$ : ( $2\gamma=90^\circ$ ;  $k=10^3$  шт/см<sup>2</sup>;  $V_{кр}=30$  м/с;  $R_1=50$  мм;  $R_2=100$  мм); 1 –  $b=10$  мкм; 2 – 20 мкм; 3 – 30 мкм; 4 – 40 мкм; 5 – 50 мкм.

Как следует из графика (рис. 3),  $Q$  интенсивно растет на участке  $Z$  от 0 до  $b$ . При  $z > b$  интенсивность изменения  $Q$  затухает, сохраняя непрерывный рост, что свидетельствует о преимуществе глубинного шлифования.

Оптимальную предельную кинематическую производительность процесса шлифования следует определять только на основании анализа влияния всех параметров, входящих в формулы (6), (9), (15), (20).

**Список литературы:** 1. Высокопроизводительное электроалмазное шлифование инструментальных материалов / М.Ф. Семко, Ю.Н. Внуков, А.И. Грабченко и др. – Киев: Вища школа, 1979. – 230 с. 2. Раб А.Ф., Новиков Ф.В. Кинематические соотношения параметров процесса шлифования изделий с прерывистыми поверхностями. – Резание и инструмент, 1980, вып. 24, с. 99-105.