

УДК 621.923

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

### **КИНЕТИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ШЛИФОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ С ПРЕРЫВИСТЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ**

Особое внимание привлекает шлифование изделий с прерывистыми поверхностями, в частности многолезвийных инструментов (разверток, зенкеров, протяжек, фрез и т. д.). Процессу шлифования прерывистых поверхностей, несмотря на их конструктивное многообразие, свойственны некоторые общие кинематические и динамические особенности. Так, при круглом, плоском и других видах шлифования многолезвийных инструментов каждый элемент обрабатываемой поверхности периодически контактирует с рабочей поверхностью круга. При этом

съем припуска имеет прерывистый характер. После выхода из контакта изделие и круг совершают относительное перемещение не производя процесса резания. Продолжительность контакта каждого элемента прерывистой поверхности с кругом и их от носительного бесконтактного перемещения определяется рядо:

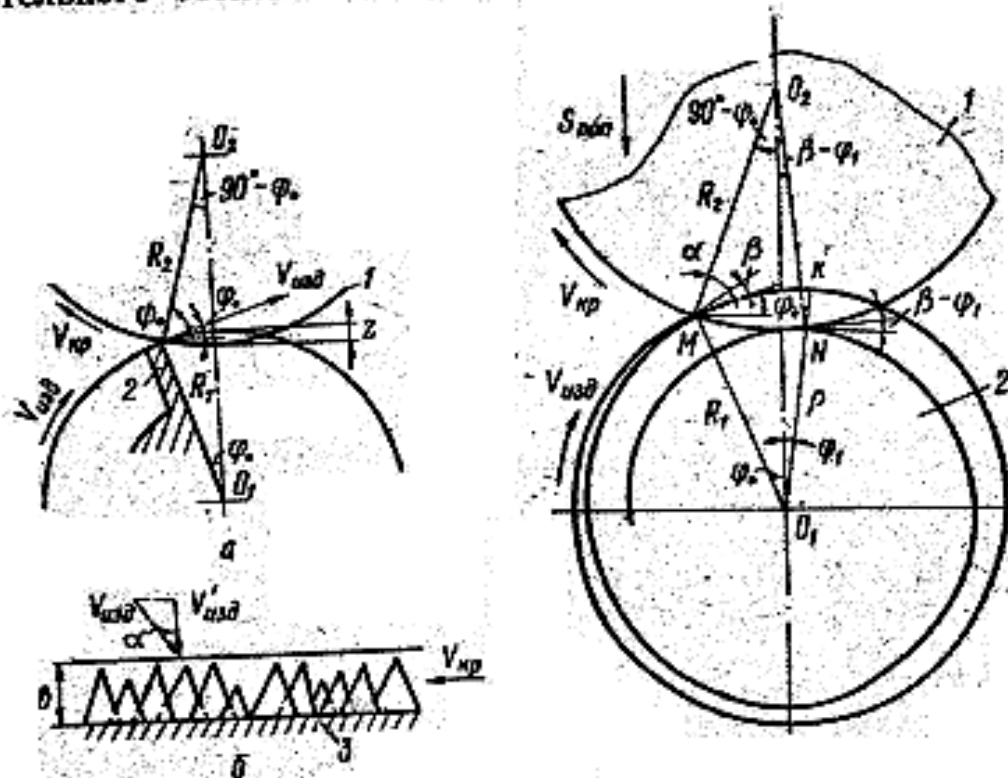


Рис. 1. Расчетная схема круглого продольного шлифования:  
1 — уровень связки круга; 2 — элемент прерывистой поверхности обрабатываемого изделия; 3 — связка круга.

Рис. 2. Расчетная схема круглого врезного шлифования:  
1 — круг; 2 — обрабатываемое изделие.

конструктивных и кинематических факторов — размерам и формам круга и изделия, режима шлифования.

Прерывистость контакта круга и изделия обуславливает ударный характер их взаимодействия, что в основном определяет механизм износа круга, качество режущих элементов инструмента, производительность съема припуска и другие технико-экономические параметры процесса шлифования. В связи с этим решающую роль приобретают вопросы правильного выбора схемы шлифования, характеристик кругов, параметров режима резания, которые бы уменьшали или даже исключали отрицательное влияние ударного характера взаимодействия круга с обрабатываемым изделием.

Решение такой задачи возможно путем аналитического описания кинематики взаимодействия круга и изделия с последующим определением оптимальных соотношений режимных факторов, характеристик круга и изделия для различных схем обработки.

Для этого рассмотрим расчетную схему процесса шлифования изделия с прерывистой поверхностью на примере круглого продольного шлифования осевого многолезвийного инструмента с прямолинейно расположенными ножами (рис. 1, а).

Для вывода соотношений основных параметров процесса шлифования воспользуемся ранее полученной формулой относительной полноты профиля рабочей поверхности круга\*:

$$\varepsilon(y) = 1 - e^{-\frac{\operatorname{tg} \gamma k V_{\text{кр}}}{3b V'_{\text{изд}}} (V_{\text{изд}} t - y)^2} \quad (1)$$

Судя по схеме взаимодействия ножа изделия с рабочей поверхностью круга (рис. 1, б), для процесса круглого шлифования изделие входит в рабочую поверхность круга под углом  $\alpha$ . Выразим  $V'_{\text{изд}}$  через окружную скорость  $V_{\text{изд}}$  и подставим в формулу (1):  $V'_{\text{изд}} = V_{\text{изд}} \cos \alpha$ , тогда

$$\varepsilon(y) = 1 - e^{-\frac{\operatorname{tg} \gamma k V_{\text{кр}}}{3b V_{\text{изд}} \cos \alpha} (V_{\text{изд}} \cos \alpha t - y)^2} \quad (2)$$

Для осуществления нормального процесса резания необходимо обеспечить полное удаление припуска изделия  $Z$ , не доходя до уровня связки. Выполнение такого условия возможно при  $\varepsilon(y) \rightarrow 1$ . Учитывая вероятностный характер функции  $\varepsilon(y)$  с достаточной для практических расчетов точностью, значение  $\varepsilon(y)$  можно принимать равным 0,95. С учетом граничных условий  $\varepsilon(0) = 0,95$  и  $b = V'_{\text{изд}} t = V_{\text{изд}} t \cos \alpha$

преобразуем выражение (2) к виду

$$1 - \varepsilon(0) = e^{-\frac{\operatorname{tg} \gamma k V_{\text{кр}} b^2}{3V_{\text{изд}} \cos \alpha}}$$

Прологарифмировав его, получим

$$V_{\text{изд}} = \frac{\operatorname{tg} \gamma k V_{\text{кр}} b^2}{9 \cos \alpha} \quad (3)$$

Для определения  $\cos \alpha = \cos(\psi_0 - \varphi_0)$  составим систему уравнений (рис. 1, а):

$$\begin{aligned} R_1 \sin \varphi_0 = R_2 \sin(90^\circ - \psi_0); \\ R_1 \cos \varphi_0 + R_2 \cos(90^\circ - \psi_0) = R_1 + R_2 - Z, \end{aligned} \quad (4)$$

\* Раб. А. Ф., Новиков Ф. В. Относительная полнота профиля рабочей поверхности круга из СТМ. (См. статью в настоящем сборнике.).

где  $R_1, R_2$  — радиусы изделия и круга;  $Z$  — глубина шлифования.

Решив систему уравнений, запишем

$$\cos(\psi_0 - \varphi_0) = \sqrt{\frac{3Z^2}{R_1 R_2} - \frac{Z^4}{4R_1^2 R_2^2} + \frac{2Z}{R_2} + \frac{Z^3}{R_1 R_2^2} + \frac{2Z}{R_1} + \frac{Z^3}{R_1^2 R_2} - \frac{Z^2}{R_1^2} - \frac{Z^2}{R_2^2}} \quad (5)$$

Упростим выражение (5) с учетом  $R_1, R_2 \gg Z$ :

$$\cos(\psi_0 - \varphi_0) = 2Z \cdot \sqrt{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} \quad (6)$$

Подставив формулу (6) в (3), получим

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

Формула (7) выражает аналитическую взаимосвязь между параметрами режима резания и характеристиками рабочей поверхности круга при круглом продольном шлифовании. Для других видов шлифования методика вывода кинематических соотношений аналогична, однако каждому виду присущи свои особенности.

Анализ расчетной схемы круглого врезного шлифования (рис. 2) показывает, что в отличие от продольного шлифования при врезном изменяется угол входа изделия  $\alpha$  в рабочую поверхность круга и глубина шлифования  $Z$ . При врезном шлифовании  $\alpha$  представляет собой угол между касательной к спирали Архимеда и радиусом круга, проведенным в точке входа нож изделия в рабочую поверхность круга ( $M$ ):  $\alpha = \psi_0 - \varphi_0 - \beta$ , где  $\beta$  — угол между касательными, проведенными в точке  $M$  к спирали Архимеда и исходной окружности изделия. Точка  $A$  представляет собой точку сопряжения исходной окружности изделия и образованной обработкой спирали Архимеда в конце первого оборота изделия. При последующих оборотах изделия точка  $M$  будет располагаться на спирали Архимеда и сопрягать обрабатываемую поверхность с поверхностью обработки.

Значение угла  $\beta$  определим из соотношения  $\text{tg } \beta = \frac{Z_1}{2\pi R_1}$  где  $Z_1 = NK$  — глубина резания (радиальная подача за один оборот изделия),

$$Z = S_n t = S_n \frac{2\pi R_1}{V_{изд}}, \quad (8)$$

тогда  $\text{tg } \beta = S_n / V_{изд}$  (9).

Для определения значения  $\cos \alpha$  воспользуемся тригонометрической зависимостью:

$$\cos(\psi_0 - \varphi_0) = \cos(\psi_0 - \varphi_0) \cos \beta + \sin(\psi_0 - \varphi_0) \sin \beta; \quad (10)$$

Для  $(\psi_0 - \varphi_0)$  определим, решая систему уравнений (4):

$$\sin(\psi_0 - \varphi_0) = 1 - \frac{Z}{R_2} - \frac{Z}{R_1} + \frac{Z^2}{2R_1R_2}, \text{ с учетом } R_1; R_2 \gg Z$$

$$\sin(\psi_0 - \varphi_0) = 1 - Z \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right); \quad (11)$$

$\sin \beta, \cos \beta$  находим из рис. 2:

$$\sin \beta = \frac{Z_1}{\sqrt{Z_1^2 + (2\pi R_1)^2}} \approx \frac{Z_1}{2\pi R_1}; \quad (12)$$

$$\cos \beta = \frac{2\pi R_1}{\sqrt{Z_1^2 + (2\pi R_1)^2}} \approx 1.$$

Выразим  $Z$  через  $Z_1$  из условия  $\varphi = \varphi_0 + \varphi_1$  (13).

Для определения  $\varphi$  составим систему уравнений (рис. 2):

$$R_2 \sin(\beta - \varphi_1) - \rho \sin \varphi_1 = 0; \quad R_2 \cos(\beta - \varphi_1) - \rho \cos \varphi_1 = A, \quad (14)$$

(где  $A = R_1 + R_2 - Z$ );

после преобразований  $\varphi_1 \approx \frac{R_2}{A} \sin \beta, \rho = A - R_2; \varphi_0'$  получим из системы уравнений (4)

$$\varphi_0 = \sqrt{\frac{R_2^2 - (A - R_1)^2}{AR_1}}, \quad (15)$$

а также из рис. 2:  $(R_1 - Z_1) + (R_1 - Z_1)\varphi \operatorname{tg} \beta = \rho$ .

Подставив  $\rho$ , запишем

$$\varphi = \frac{(A - R_2) - (R_1 - Z_1)}{(R_1 - Z_1) \operatorname{tg} \beta}. \quad (16)$$

Подставим уравнения (14) — (16) в (13):

$$\frac{A - R_2 - R_1 - Z}{(R_1 - Z_1) \operatorname{tg} \beta} = \sqrt{\frac{R_2^2 - (A - R_1)^2}{AR_1}} + \frac{R_2}{A} \sin \beta.$$

После преобразований и упрощений с учетом  $R_1; R_2 \gg Z; Z_1$  получим

$$Z = Z_1 + \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)} \operatorname{tg}^2 \beta - 2 \sqrt{\frac{R_1 R_2}{2(R_1 + R_2)}} \times \\ \times \operatorname{tg}^2 \beta \sqrt{Z_1 - \frac{R_1 R_2}{2(R_1 + R_2)} \operatorname{tg}^2 \beta}. \quad (17)$$

Найденные значения (6), (11), (12) с учетом выражения (17) подставим в уравнение (10):

$$\cos(\psi_0 - \varphi_0 - \beta) = 2 \sqrt{\pi \frac{S_n}{V_{\text{изл}}}} \cdot \sqrt{\frac{R_1}{R_2} + 1} \quad (18)$$

Подставив в формулу (3) уравнение (18), после преобразования запишем

$$V_{\text{изл}} = \frac{\text{tg}^2 \gamma k^2 V_{\text{кр}}^2 b^4}{324 \pi S_n \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)} \quad (19)$$

Уравнение (19) выражает кинематические соотношения основных параметров процесса врезного шлифования.

Кинематические соотношения для плоского шлифования можно получить из уравнения (7), полагая  $R_1 = \infty$ :

$$V_{\text{изл}} = 0,08 \text{tg} \gamma k V_{\text{кр}} b^2 \frac{\sqrt{R_2}}{\sqrt{Z}} \quad (20)$$

Для внутреннего шлифования принимаем  $R_1$  отрицательным; тогда

$$V_{\text{изл}} = 0,08 \text{tg} \gamma k V_{\text{кр}} b^2 \frac{1}{\sqrt{Z} \cdot \sqrt{\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1}}} \quad (21)$$

Для охватывающего шлифования, принимая  $R_2 \cong -R_1 = R$  и учитывая слагаемые второго порядка в уравнении (5), после подстановки в уравнение (7) получим

$$V_{\text{изл}} = \frac{\text{tg} \gamma k V_{\text{кр}} b^2 R}{9\sqrt{3}Z} \quad (22)$$

При продольном шлифовании кругом чашечной формы с учетом  $R_2 = \infty$  из формулы (7) запишем

$$V_{\text{изл}} = 0,08 \text{tg} \gamma k V_{\text{кр}} b^2 \frac{\sqrt{R_1}}{\sqrt{Z}} \quad (23)$$

Таким образом, используя формулу относительной полноты профиля рабочей поверхности круга, можно установить кинематические соотношения для различных видов шлифования. Такие соотношения (20) — (23) получены как частные случаи круглого продольного шлифования. Аналогичным образом можно рассчитать формулы для различных схем врезного шлифования из формулы (19).

Следовательно, основными расчетными схемами для вывода кинематических соотношений всего многообразия схем шлифования является круглое продольное и врезное шлифование.

Выведенные кинематические соотношения позволяют установить предельные значения параметров режима шлифования в зависимости от характеристики рабочей поверхности круга. При соблюдении предельных значений параметров режима шлифования может быть достигнуто максимальное использование потенциальной режущей способности круга, обусловленной параметрами ее рабочей поверхности.

Превышение предельных значений параметров режима шлифования приведет к контакту обрабатываемого изделия со связкой круга и, следовательно, к неблагоприятным последствиям.

Кинематические соотношения позволяют строить процесс шлифования так, чтобы полный срез врезающегося в рабочую поверхность круга ножа изделия с прерывистой поверхностью производился на любом необходимом уровне выступания зерен над связкой круга. В этом и заключается способ управления процессом шлифования изделий с прерывистыми поверхностями, полностью исключая ударное воздействие ножа изделия в связку круга и снижающего ударное воздействие о зерна.

При определенных условиях контакт прерывистого изделия с рабочей поверхностью круга будет происходить на определенной высоте наиболее выступающих зерен. Оптимальные значения такой высоты могут быть установлены только на основе динамических исследований.

*Поступила 20 июля 1979 г.*