

УПРОЩЕННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КИНЕМАТИКИ ПРОЦЕССА ШЛИФОВАНИЯ

Новиков Ф.В., докт. техн. наук

(Харьковский государственный экономический университет)

Рассмотрен новый упрощенный подход к расчету параметров кинематики шлифования, позволивший выявить новые закономерности процесса, связанные с увеличением производительности обработки с учетом ограничений по предельной толщине среза и шероховатости обработки.

В научно-технической литературе вопросам математического моделирования

процесса шлифования уделяется большое внимание, что связано со сложностью изучения физических явлений, протекающих при шлифовании. Много работ посвящено моделированию кинематики шлифования. Однако, в полном объеме проблема не решена, т.к. сьем материала и формообразование поверхностей при шлифовании подчиняются вероятностным законам, математическое представление которых затруднено. В связи с этим, наметились два направления решения проблемы. В одних случаях прибегают к весьма упрощенному (чисто геометрическому) представлению кинематики шлифования, аналогич-

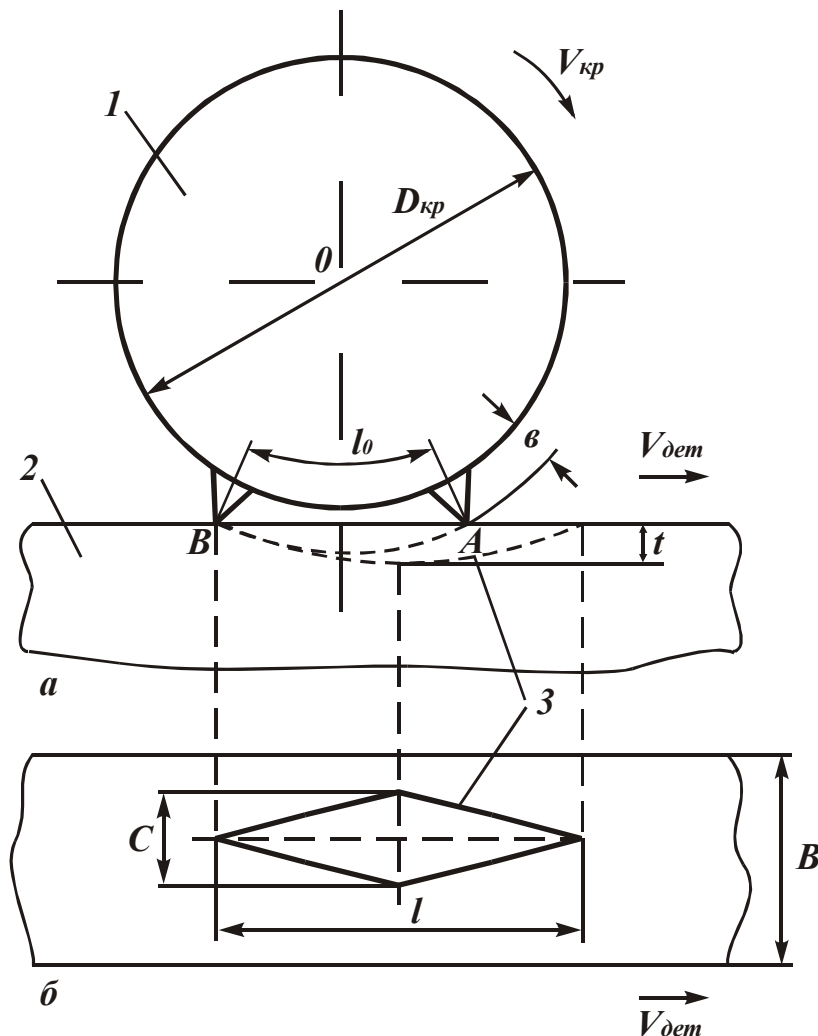


Рис.1. Расчетная схема образования риски-царапины при шлифовании, представленная в двух проекциях (а, б):

1- круг; 2 – обрабатываемая деталь; 3 – форма риски-царапины.

но процессам резания многолезвийными инструментами. В других случаях, наоборот, к весьма сложным расчетным схемам, в результате чего полученные решения требуют применения численных методов расчета, что, как правило, теряет их наглядность, общность, а порой и физический смысл.

Для правильного понимания кинематики шлифования необходимо следовать принципу: от простого к сложному, т.е. первоначально получить упрощенные решения, затем – более сложные, учитывающие большее количество параметров процесса и связей между ними.

В наших работах [1, 2, 3] основное внимание уделено уточненным расчетным схемам кинематики шлифования, учитывающим главную особенность процесса шлифования – вероятность участия зерен в резании. Для более полного анализа процесса, как отмечалось выше, необходимо располагать и упрощенными решениями, не рассматривающими случайный характер участия зерен в резании, чему, собственно, и посвящена данная работа.

Процесс шлифования представляет собой массовое резание – царапание обрабатываемого материала абразивными или алмазными зернами, расположенными на рабочей поверхности шлифовального круга, рис 1, а. В результате механического взаимодействия режущих зерен круга с деталью на обрабатываемой поверхности образуется множество рисок – царапин, которые, накладываясь и перекрываясь, приводят к общему съему материала (удалению припуска), рис 1, б. Для того чтобы произошел полный съем материала с обрабатываемой поверхности (т.е. чтобы вся поверхность была покрыта рисками - царапинами), необходимо выполнить условие

$$F_{рис} = F_{ном}, \quad (1)$$

где $F_{рис}$ - суммарная площадь рисок – царапин, образующихся на обрабатываемой поверхности, $м^2$;

$F_{ном}$ - заданная номинальная площадь обрабатываемой поверхности, $м^2$.

Для расчета $F_{рис}$ примем в первом приближении допущение об одновысотном выступании зерен над уровнем связки круга, равным b . Рабочую часть зерна представим в форме конуса с углом при вершине 90^0 . Длину риски – царапины при плоском шлифовании l определим, исходя из рис 1, а:

$$l = l_0 + V_{дет.} \cdot \tau, \quad (2)$$

где $l_0 = \sqrt{D_{кр.} \cdot t}$ - длина дуги контакта шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью, м;

$D_{кр.}$ - диаметр круга, м; $V_{дет.}$ - скорость детали, м/с;

$\tau = \frac{l_0}{V_{кр.}}$ - время, за которое режущее зерно переместится из точки А в точку В;

$V_{кр.}$ - скорость круга, м/с.

После преобразований, имеем

$$l = \sqrt{D_{кр.} \cdot t} \cdot \left(1 + \frac{V_{дет.}}{V_{кр.}}\right). \quad (3)$$

Примем, что половина ширины образующейся риски – царапины C равна глубине шлифования t , тогда площадь риски – царапины $F_{1рис.} = 0,5 \cdot l \cdot c$ определится

$$F_{1рис.} = 0,5 \cdot \sqrt{D_{кр.} \cdot t} \cdot t \cdot \left(1 + \frac{V_{дет.}}{V_{кр.}}\right). \quad (4)$$

Суммарная площадь рисков – царапин, образующихся от участия в резании n зерен круга, равна $F_{рис.} = n \cdot F_{1рис.}$ Число зерен n , проконтактировавших с обрабатываемой поверхностью длиной L и шириной B , определяется

$$n = k \cdot B \cdot V_{кр.} \cdot \tau = k \cdot B \cdot V_{кр.} \cdot \frac{L}{V_{дет.}}, \quad (5)$$

где k - поверхностная концентрация зерен круга, шт/м²;

B - ширина шлифования, м.

Тогда

$$F_{рис.} = 0,5 \cdot \sqrt{D_{кр.} \cdot t} \cdot k \cdot B \cdot L \cdot \frac{V_{кр.}}{V_{дет.}} \cdot \left(1 + \frac{V_{дет.}}{V_{кр.}}\right). \quad (6)$$

Площадь $F_{рис.}$ тем больше, чем больше параметры $D_{кр.}$, k , t , B , L . Параметры режима шлифования $V_{дет.}$ и $V_{кр.}$ неоднозначно влияют на $F_{рис.}$.

Номинальную площадь обрабатываемой поверхности примем равной $F_{ном.} = B \cdot L$. Подставляя выражения для определения параметров $F_{рис.}$ и $F_{ном.}$ в (1), установим глубину шлифования t_0 , при которой происходит полный съем материала с обрабатываемой поверхности

$$t_0 = 3 \sqrt[3]{\left[\frac{2}{\sqrt{D_{кр.}} \cdot k \cdot \frac{V_{кр.}}{V_{дет.}} \cdot \left(1 + \frac{V_{дет.}}{V_{кр.}}\right)} \right]^2}. \quad (7)$$

С физической точки зрения глубина шлифования t_0 равна максимальной высоте микронеровностей обработанной поверхности (параметру шероховатости обработки R_{max}).

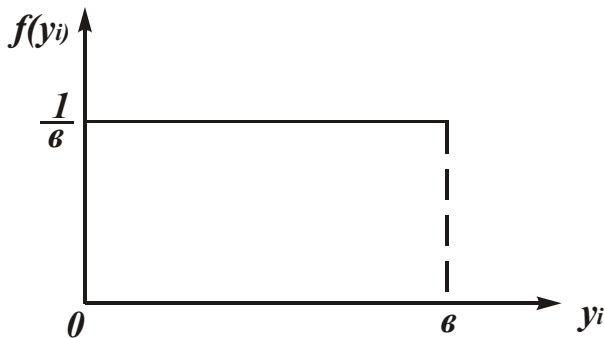


Рис.2. Вид функции $f(y_i)$

Уменьшить $t_0 = R_{max}$ можно увеличением параметров $D_{кр.}$ и k . Для того чтобы определить экстремальное значение $\alpha = \frac{V_{дем.}}{V_{кр.}}$, продифференцируем функцию t_0 по α и полученное выражение приравняем к нулю. В результате расчетов установлено, что экстремум (максимум) функции t_0 достигается при $\alpha \rightarrow \infty$, т.е. при $V_{дем.} \rightarrow \infty$ или $V_{кр.} \rightarrow 0$. Из этого следует, что с увеличением α глубина шлифования t_0 непрерывно увеличивается. Определяющим в зависимости (7) является множитель α . Множитель $(1 + \alpha)$ в первом приближении можно не рассматривать, так как на практике реализуются значения $V_{кр.} \gg V_{дем.}$. Зависимость (7) выразится

$$t_0 = 3 \sqrt[3]{\left[\frac{2 \cdot V_{дем.}}{\sqrt{D_{кр.} \cdot k \cdot V_{кр.}}} \right]^2} \quad (8)$$

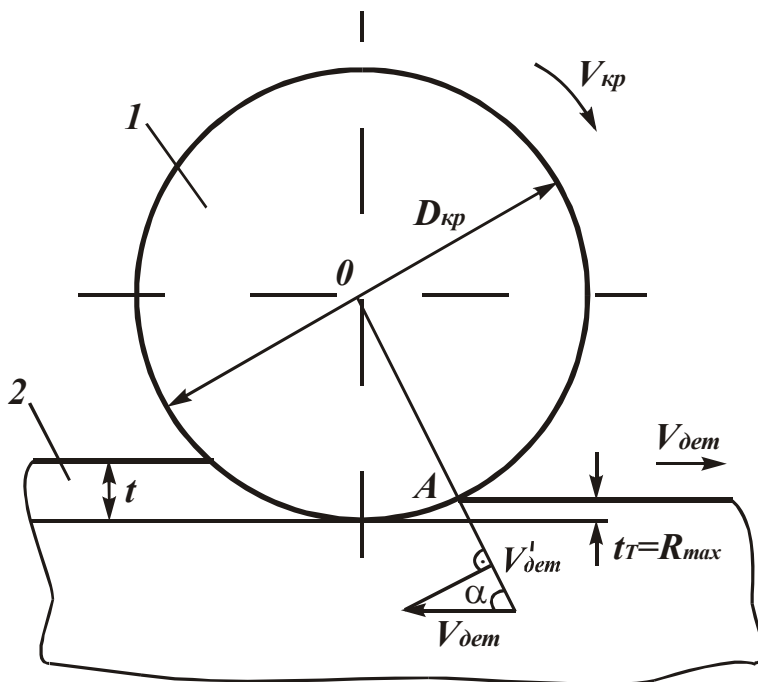


Рис.3. Расчетная схема плоского шлифования: 1 – круг; 2 – обрабатываемая деталь.

Проведенный анализ справедлив для шлифования кругом с одновысотным выступанием зерен над уровнем связки. В реальных условиях имеет место разновысотное выступание зерен над уровнем связки. Предположим, что выступание вершин зерен подчинено равномерному закону распределения с плотностью $f(y_i) = \frac{1}{b}$, где b - максимальная высота выступания вершин зерен над уровнем связки, рис.2. Тогда в резании будут участвовать не

все зерна, расположенные на рабочей поверхности круга, а лишь часть зерен, определяемых из соотношения

$$k_0 = k \cdot \frac{R_{max}}{b}, \quad (9)$$

где k - поверхностная концентрация зерен круга, шт/м².

Подставим зависимость (9) в (8)

$$R_{max} = 5 \sqrt[5]{\left[\frac{2 \cdot b \cdot V_{дет.}}{\sqrt{D_{кр.}} \cdot k \cdot V_{кр.}} \right]^2}. \quad (10)$$

В отличие от зависимости (8), параметры, входящие в (10), в меньшей степени влияют на $R_{max} = t_0$.

Глубина шлифования t явно не входит в зависимость (10). Однако, она связана с важнейшим параметром шлифования – максимальной толщиной среза $a_{z max}$, которая должна быть меньше максимальной высоты выступания зерен над уровнем связки b . Для определения максимальной толщины среза представим $V_{дет.}$ в виде (рис. 3)

$$V_{дет.} = \frac{V'_{дет.}}{\cos \alpha} = \frac{V'_{дет.}}{\sqrt{D_{кр.}} \cdot t_T}, \quad (11)$$

где $V'_{дет.}$ проекция скорости $V_{дет.}$ на линию АО;

α - угол между векторами скоростей $V_{дет.}$ и $V'_{дет.}$;

t_T - текущее значение глубины резания.

Принимая $t_T = R_{max}$ и подставляя (11) в зависимость (10), получим

$$R_{max} = 3 \sqrt[3]{\frac{2 \cdot b \cdot V'_{дет.}}{k \cdot V_{кр.} \cdot D_{кр.}}}. \quad (12)$$

По физической сущности параметр R_{max} равен толщине среза a_z . Подставляя в (12) вместо $V'_{дет.}$ выражение (11), имеем

$$a_z = 3 \sqrt[3]{\frac{2 \cdot b \cdot V_{дет.} \cdot \sqrt{t_T}}{k \cdot V_{кр.} \cdot \sqrt{D_{кр.}}}}. \quad (13)$$

С увеличением t_T толщина среза a_z увеличивается. Максимальное значение a_z достигается при $t_T = t$, тогда

$$a_{z max} = 3 \sqrt[3]{\frac{2 \cdot b \cdot V_{дет.} \cdot \sqrt{t}}{k \cdot V_{кр.} \cdot \sqrt{D_{кр.}}}}. \quad (14)$$

Параметр $a_{z max}$, тем больше, чем больше $b, V_{дет.}, t$ и меньше $k, V_{кр.}, D_{кр.}$. Таким образом показано, что глубина шлифования t ограниче-

на параметром $a_{z\max} < b$. Установим связь между параметрами $a_{z\max}$ и $R_{z\max}$. Для этого подставим правую часть зависимости (10) в (14)

$$a_{z\max} = R_{z\max}^{\frac{5}{6}} \cdot t^{\frac{1}{6}} \quad (15)$$

или

$$R_{z\max} = a_{z\max} \cdot \left(\frac{a_{z\max}}{t}\right)^{\frac{1}{5}}. \quad (16)$$

Так как $a_{z\max} < t$, то $R_{z\max} < a_{z\max}$. С увеличением глубины шлифования t , при заданном значении $a_{z\max}$, параметр шероховатости обработки $R_{z\max}$ уменьшается. Это указывает на эффективность применения глубинного шлифования, осуществляемого с большими глубинами шлифования (на 1...4 порядка превышающими глубины традиционных методов шлифования). Однако, исходя из зависимости (16), основное влияние на параметр $R_{z\max}$ оказывает максимальная толщина среза $a_{z\max}$. За счет ее уменьшения можно добиться существенного уменьшения параметра шероховатости обработки $R_{z\max}$.

Определим максимально возможную производительность обработки $Q = B \cdot V_{\text{дет.}} \cdot t$ для заданной максимальной толщины среза $a_{z\max}$. Используя зависимость (14), имеем

$$Q = \frac{B \cdot k \cdot V_{\text{кр.}} \cdot \sqrt{D_{\text{кр.}} \cdot t} \cdot a_{z\max}^3}{2 \cdot b \cdot t}. \quad (18)$$

Соответственно скорость детали $V_{\text{дет.}}$ определится

$$V_{\text{дет.}} = \frac{k \cdot V_{\text{кр.}} \cdot \sqrt{D_{\text{кр.}} \cdot t} \cdot a_{z\max}^3}{2 \cdot b \cdot \sqrt{t}}. \quad (19)$$

Производительность обработки Q тем больше, чем больше параметры $B, k, V_{\text{кр.}}, D_{\text{кр.}}, t, a_{z\max}$ и меньше b . Наибольшее влияние на Q оказывает $a_{z\max}$. Скорость детали $V_{\text{дет.}}$ при этом с увеличением t необходимо уменьшать.

Таким образом показано, что применение глубинного шлифования (наряду с уменьшением шероховатости обработки $R_{z\max}$) позволяет увеличить производительность обработки Q для заданного значения $a_{z\max}$, обусловленного, например, прочностными свойствами шлифовального круга.

Рассмотрим соотношение $Z = F_{\text{рас.}} / F_{\text{ном.}}$:

$$Z = 0,5 \cdot \sqrt{D_{\text{кр.}} \cdot t} \cdot t \cdot k \cdot \frac{V_{\text{кр.}}}{V_{\text{дет.}}} \quad (19)$$

или с учетом зависимости (7)

$$Z = \left(\frac{t}{t_0}\right)^{1,5}. \quad (20)$$

При $Z < 1$ полный съем материала (полное перекрытие рисками – царапинами обрабатываемой поверхности) не происходит. Увеличить Z до значения $Z \geq 1$ можно увеличением параметров $k, D_{кр}, t$, соотношения $V_{кр.} / V_{дет.}$ и количества проходов круга (при продольном шлифовании). В последнем случае за счет увеличения количества проконтактировавших с обрабатываемой поверхностью зерен n стабилизация процесса съема материала наступает после определенного числа проходов круга. В результате фактическая глубина шлифования становится больше номинальной глубины шлифования, устанавливаемой по лимбу станка. Для нормального протекания процесса шлифования фактическая глубина должна быть меньше высоты выступания зерен над уровнем связки круга b .

При $t > t_0$ коэффициент $Z > 1$. Подставим в (20) выражение для определения глубины шлифования t , полученное из зависимости (15)

$$Z = \left(\frac{a_{z\max}}{R_{\max}}\right)^9. \quad (21)$$

Так как $a_{z\max} > R_{\max}$, то $Z \gg 1$. Например, для $a_{z\max}/R_{\max}=2$ коэффициент $Z = 512$. Как отмечалось выше, при глубинном шлифовании соотношение $a_{z\max}/R_{\max}$ больше, чем при традиционном (многопроходном) шлифовании, когда значения параметров $a_{z\max}$ и R_{\max} близки, т.е. $a_{z\max}/R_{\max} \approx 1$. Следовательно, при глубинном шлифовании коэффициент $Z \gg 1$ больше, чем при многопроходном шлифовании ($Z \approx 1$).

Полученные решения близки к аналогичным решениям, приведенным в наших работах [1, 2, 3], учитывающих более сложный вероятностный характер участия зерен в резании при шлифовании.

Список литературы

1. Якимов О.В., Новиков Ф.В., Новиков Г.В., Якимов О.О. Високопродуктивне шліфування: Навчальний посібник. –К.: ІСДО, 1995. – 180с.
2. 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, 199. – 450с.
3. Новиков Ф.В. Физические и кинематические основы высокопроизводительного алмазного шлифования. – Автореф. дис.... докт. техн. наук. – Одесса, 1995. –36с.