

ЗАКОНОМЕРНОСТИ СЪЕМА МАТЕРИАЛА И ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ ШЛИФОВАНИИ

В силу сложности кинематики и физики процесса шлифования до настоящего времени не удастся в полной мере раскрыть его потенциальные возможности в плане повышения производительности и качества обработки. Несмотря на чрезвычайно большое количество опубликованных работ по проблемам шлифования, отсутствует четкая математическая модель шлифования, позволяющая с единых позиций описать основные параметры обработки и выявить наиболее предпочтительные пути развития этого прогрессивного метода обработки [1–3]. Поэтому целью работы является разработка упрощенного теоретического подхода к аналитическому описанию закономерностей съема материала и формообразования поверхностей при шлифровании и на их основе установление путей повышения эффективности обработки.

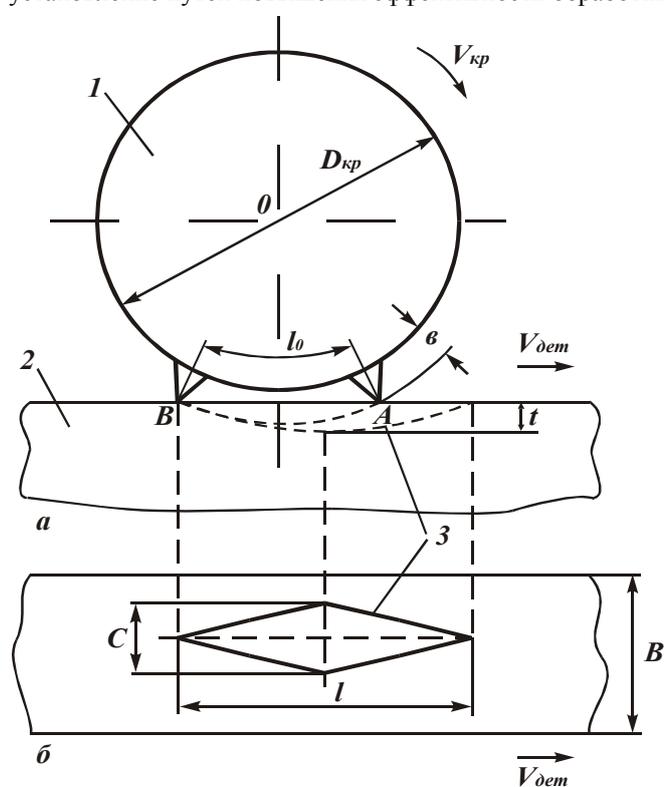


Рис. 1. Расчетная схема образования риски-царапины при шлифовании, представленная в двух проекциях (а, б): 1 – круг; 2 – деталь; 3 – форма риски-царапины.

$D_{кр}$ – диаметр круга, м; $V_{дет}$ – скорость детали, м/с; $\tau = l_0 / V_{кр}$ – 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

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

Процесс шлифования представляет собой массовое резание – царапание обрабатываемого материала абразивными или алмазными зёрнами, расположенными на рабочей поверхности шлифовального круга, рис 1,а. В результате механического взаимодействия режущих зёрен круга с деталью на обрабатываемой поверхности образуется множество рисков-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 рисков-царапин, образующихся на обрабатываемой поверхности, м²; $F_{ном}$ – заданная номинальная площадь обрабатываемой поверхности, м².

Для расчета $F_{рис}$ примем в первом приближении допущение об одновысотном выступании зёрен над уровнем связки круга, равном b . Рабочую часть зёрна представим в форме конуса с углом при вершине 90° . 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;

Суммарная площадь рисок – 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

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

где k – поверхностная концентрация зерен круга, шт/м²; B – ширина шлифования, м.

Тогда

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

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

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

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

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

Уменьшить $t_0 = R_{max}$ можно увеличением параметров $D_{кр}$ и k . Для того чтобы определить экстремальное значение $\alpha = V_{дем}/V_{кр}$, 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

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

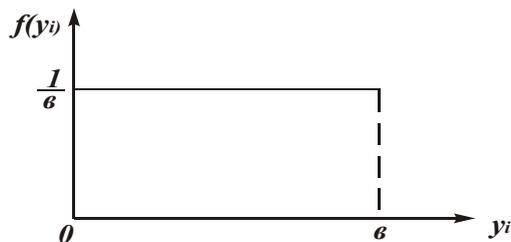


Рис. 2. Вид функции $f(y_i)$.

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 $f(y_i) = 1/\epsilon$, где ϵ – максимальная высота выступления 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

$$k_0 = k \cdot \frac{R_{max}}{\epsilon}. \quad (9)$$

Подставим зависимость (9) в (8):

$$R_{max} = \sqrt[3]{\left[\frac{2 \cdot \epsilon \cdot V_{дем}}{\sqrt{D_{кр}} \cdot k \cdot V_{кр}} \right]^2}. \quad (10)$$

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 выступления зерен над уровнем связки ϵ . Для определения максимальной толщины среза представим $V_{дем}$ в виде (рис. 3) [4]:

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

где $V'_{\text{дем}}$ – проекция скорости $V_{\text{дем}}$ на линию АО; α – угол между векторами скоростей $V_{\text{дем}}$ и $V'_{\text{дем}}$; t_T – текущее значение глубины резания.

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

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

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

$$a_z = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot \epsilon \cdot V_{\text{дем}} \cdot \sqrt{t_T}}{k \cdot V_{\text{кр}} \cdot \sqrt{D_{\text{кр}}}}} \quad (13)$$

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

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

Параметр $a_{z\text{max}}$, тем больше, чем больше $\epsilon, V_{\text{дем}}, t$ и меньше $k, V_{\text{кр}}, D_{\text{кр}}$. Таким образом показано, что глубина шлифования t ограничена параметром $a_{z\text{max}} < \epsilon$. Установим связь между параметрами $a_{z\text{max}}$ и $R_{z\text{max}}$.

Для этого подставим правую часть зависимости (10) в (14):

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

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

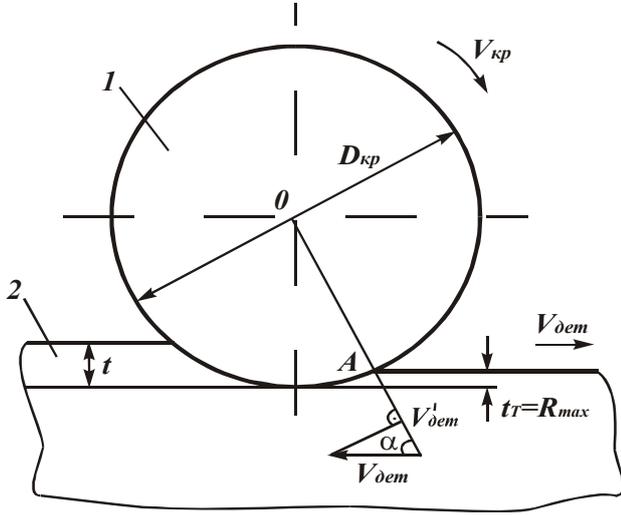


Рис. 3. Расчетная схема плоского шлифования:
1 – круг; 2 – обрабатываемая деталь.

Так как $a_{z\text{max}} < t$, то $R_{z\text{max}} < a_{z\text{max}}$. С увеличением глубины шлифования t , при заданном значении $a_{z\text{max}}$, параметр шероховатости обработки $R_{z\text{max}}$ 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 $R_{z\text{max}}$ оказывает максимальная толщина среза $a_{z\text{max}}$. За счет ее уменьшения можно добиться существенного уменьшения параметра шероховатости обработки $R_{z\text{max}}$.

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

$$Q = \frac{B \cdot k \cdot V_{\text{кр}} \cdot \sqrt{D_{\text{кр}}} \cdot t \cdot a_{z\text{max}}^3}{2 \cdot \epsilon \cdot t} \quad (17)$$

Соответственно скорость детали $V_{\text{дем}}$ определится

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

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

Таким образом показано, что применение глубинного шлифования (наряду с уменьшением шероховатости обработки $R_{z\text{max}}$) позволяет увеличить производительность обработки Q для заданного значения $a_{z\text{max}}$, обусловленного, например, прочностными свойствами шлифовального круга. Рассмотрим соотношение $Z = F_{\text{рас}} / F_{\text{ном}}$:

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

С учетом зависимости (7), имеем

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

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 шлифования должна быть меньше высоты выступания зерен над уровнем связки круга ν .

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

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

Так как $a_{zmax} > R_{max}$, то коэффициент $Z \gg 1$. Например, для $a_{zmax}/R_{max} = 2$ коэффициент $Z = 512$. Как отмечалось выше, при глубинном шлифовании соотношение a_{zmax}/R_{max} больше, чем при традиционном (многопроходном) шлифовании, когда значения параметров a_{zmax} и R_{max} близки, т.е. $a_{zmax}/R_{max} \approx 1$. Следовательно, при глубинном шлифовании коэффициент $Z \gg 1$ больше, чем при многопроходном шлифовании ($Z \approx 1$). Этим объясняется эффект глубинного шлифования, связанный с увеличением производительности обработки при одновременном уменьшении высоты микронеровностей обработанной поверхности. Данные результаты согласуются с аналогичными результатами, полученными с использованием теоретико-вероятностного подхода при шлифовании [5].

ВЫВОДЫ

В работе приведены упрощенные зависимости для определения основных параметров шлифования, позволяющие научно обоснованно подойти к раскрытию сложных кинематических и физических закономерностей процесса шлифования. На основе полученных зависимостей проведено сравнение многопроходного и глубинного шлифования по шероховатости обработанной поверхности и производительности обработки. Показано, что переход в область глубинного шлифования позволяет одновременно повысить производительность обработки и уменьшить высоту микронеровностей на обработанной поверхности. Теоретически доказано, что эффект глубинного шлифования обусловлен значительным превышением суммарной площади рисок-царапин, образующихся на обрабатываемой поверхности, над номинальной площадью обрабатываемой поверхности.

Перечень ссылок

1. Маслов Е.Н. Теория шлифования металлов / Е.Н. Маслов. – М.: Машиностроение, 1974. – 319 с.
2. Корчак С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей / С.Н. Корчак. – М.: Машиностроение, 1974. – 280 с.
3. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю.К. Новоселов. – Саратов, 1979. – 232 с.
4. Новиков Ф.В. Физические и кинематические основы высокопроизводительного алмазного шлифования: автореф. дис. на соискание научн. степени докт. техн. наук: спец. 05.03.01 “Процессы механической обработки, станки и инструменты” / Ф.В. Новиков. – Одесса, 1995. – 36 с.
5. 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, 1999. – 450 с.

Статья поступила 20.04.2011г.