

УДК 621.923.1

**АНАЛІЗ ПАРАМЕТРОВ ОБРОБКИ ПРИ ПЛОСКОМ ШЛІФУВАННІ**

©Стрельчук Р. М.

*Українська інженерно-педагогічна академія***Інформація про автора:**

**Стрельчук Роман Михайлович:** ORCID: 0000-0002-7221-031X; r.m.strelchuk@gmail.com; кандидат технічних наук; доцент кафедри інформаційних комп'ютерних і поліграфічних технологій; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

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 рисков-царапин, образующихся на обрабатываемой поверхности, над номинальной площадью обрабатываемой поверхности. В результате исследования установлено, что фактическая глубина шлифования становится больше номинальной глубины шлифования, устанавливаемой по лимбу станка, поэтому для нормального протекания процесса шлифования фактическая глубина шлифования должна быть меньше высоты выступания зерен над уровнем связки круга.

**Ключевые слова:** процесс шлифования; съем материала; алмазное зерно; ширина и толщина среза; микронеровность поверхности.

**Стрельчук Р. М.** «Аналіз параметрів обробки при плоскому шліфуванні».

В роботі наведено спрощені залежності для визначення основних параметрів шліфування, що дозволяють науково обґрунтовано підійти до розкриття складних кінематичних і фізичних закономірностей процесу шліфування. На основі отриманих залежностей проведено порівняння багато-прохідного і глибинного шліфування по шорсткості обробленої поверхні і продуктивності обробки. Показано, що перехід в область глибинного шліфування дозволяє одночасно підвищити продуктивність обробки і зменшити висоту микронеровностей на обробленій поверхні. Теоретично доведено, що ефект глибинного шліфування обумовлений значним перевищенням сумарної площі рисков-подряпин, що утворюються на оброблюваної поверхні, над номінальною площею оброблюваної поверхні. В результаті дослідження встановлено, що фактична глибина шліфування стає більше номінальної глибини шліфування, яка встановлюється по лімбу верстата, тому для нормального протікання процесу шліфування фактична глибина шліфування повинна бути менше висоти виступання зерен над рівнем зв'язки круга.

**Ключові слова:** процес шліфування; знімання матеріалу; алмазне зерно, ширина і товщина зрізу; микронерівність поверхні.

**Strelchuk R.** “Analysis of processing parameters for flat grinding”.

In the article presents simplified dependencies for determining the main parameters of grinding, which make it possible to scientifically justify the discovery of complex kinematic and physical laws of the grinding process. On the basis of the obtained dependences, a comparison of multi-pass and deep grinding by roughness of the treated surface and processing capacity was carried out. It is shown that the transition to the area of deep grinding allows simultaneously increasing the productivity of processing and reducing the height of microroughness on the treated surface. It has been theoretically proved that the effect of deep grinding is caused by a significant excess of the total area of scratches, scratches, formed on the surface to be treated, above the nominal surface area of the treated surface. As a result of the study it was found that the actual grinding depth becomes larger than the nominal grinding depth established on the machine limb, so for the normal course of the grinding process the actual grinding depth should be less than the protrusion height of the grains above the level of the ligament of the circle.

**Key words:** grinding process; material removal; diamond grain; width and thickness of the cut; microroughness of the surface.

## 1. Введение

В силу сложности кинематики и физики процесса шлифования до настоящего времени не удается 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].

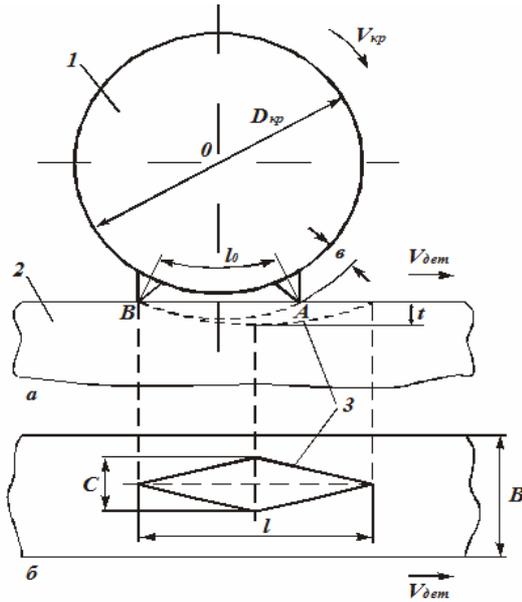
## 2. Методология исследования

Поэтому целью работы является разработка упрощенного теоретического подхода к аналитическому описанию закономерностей съема материала и формообразования поверхностей при плоском шлифовании и на их основе установление путей повышения эффективности обработки.

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<sup>2</sup>;  $F_{ном}$  – заданная номинальная площадь обрабатываемой поверхности, м<sup>2</sup>.



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

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 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

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

где  $k$  – поверхностная концентрация зерен круга, шт/м<sup>2</sup>;  $B$  – 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 сьем материала с обрабатываемой поверхности

### 3. Результаты исследований

Для расчета  $F_{рис}$  примем в первом приближении допущение об одновысотном выступании зерен над уровнем связки круга, равном  $b$ . Рабочую часть зерна 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;  $D_{кр}$  – 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.

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

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

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

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

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  $\epsilon$  – 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

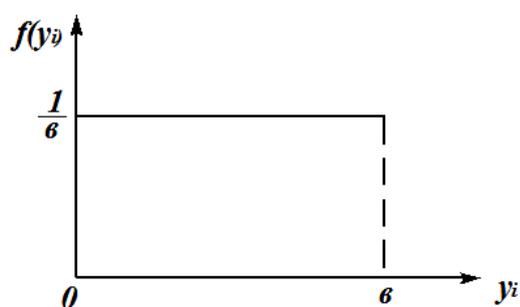


Рис. 2 – Вид функции  $f(y_i)$

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

Подставим зависимость (9) в (8):

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

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

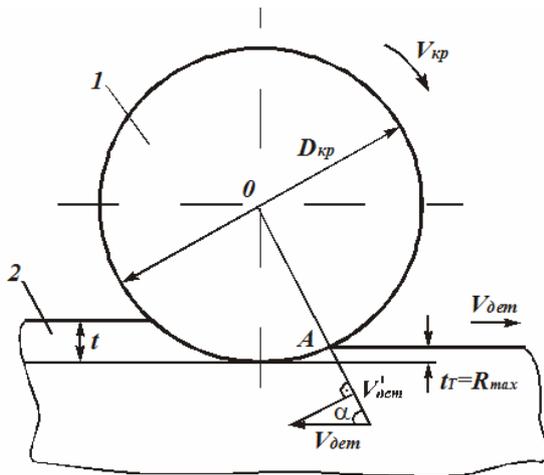
Глубина шлифования  $t$  явно не входит в зависимость (10). Однако, она связана с важнейшим параметром шлифования – максимальной толщиной среза  $a_{z_{max}}$ , которая должна

## Верстати та інструменти

быть меньше максимальной высоты выступания зерен над уровнем связки  $\epsilon$ . Для определения максимальной толщины среза представим  $V_{\text{дем}}$  в виде (рис. 3) [4]:

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

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



**Рис. 3** – Расчетная схема плоского шлифования:

1 – круг; 2 – обрабатываемая деталь  
достигается при условии  $t_T = t$ , тогда

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

Параметр  $a_{z \max}$ , 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  $a_{z \max} < \epsilon$ . Установим связь между параметрами  $a_{z \max}$  и  $R_{z \max}$ .

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

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

откуда

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

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  $R_{z \max}$

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  $R_{\text{max}}$  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  $a_z$

оказывает максимальная толщина среза  $a_{z\max}$ . За счет ее уменьшения можно добиться существенного уменьшения параметра шероховатости обработки  $R_{\max}$ .

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

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

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

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

Производительность обработки  $Q$  тем больше, чем больше параметры  $B, k, V_{\text{кр}}, D_{\text{кр}}, t, a_{z\max}$  и меньше  $v$ . 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  $R_{\max}$ ) позволяет увеличить производительность обработки  $Q$  для заданного значения  $a_{z\max}$ , обусловленного, например, прочностными свойствами шлифовального круга. Рассмотрим соотношение  $Z = F_{\text{рас}} / F_{\text{ном}}$ :

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

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  $k, D_{\text{кр}}, t$ , соотношения  $V_{\text{кр}} / V_{\text{дет}}$  и количества проходов круга (при продольном шлифовании). В последнем случае за счет увеличения количества проконтактировавших с обрабатываемой поверхностью зерен и 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  $v$ .

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

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

## Верстати та інструменти

---

Так как  $a_{z_{\max}}/R_{\max}$ , то коэффициент  $Z \gg 1$ . 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 ( $Z \approx 1$ ). Этим объясняется эффект глубинного шлифования, связанный с увеличением производительности обработки при одновременном уменьшении высоты микронеровностей обработанной поверхности.

### 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.

### Список использованных источников:

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 : Изд-во Саратов. ун-та, 1979. – 232 с.
4. 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.

### References

1. Maslov, Ye 1974, *Teoriya shlifovaniya metallov*, Mashinostroyeniye, Moskva.
2. Korchak, S 1974, *Proizvoditelnost protsesssa shlifovaniya stalnykh detaley*, Mashinostroyeniye, Moskva.
3. Novoselov, Yu 1979, *Dinamika formoobrazovaniya poverkhnostey pri abrazivnoy obrabotke*, Izd-vo Saratov. un-ta, Saratov.
4. Yakimov, A, Novikov, F, Novikov, G, Serov, B & Yakimov, A 1999, *Teoreticheskiye osnovy rezaniya i shlifovaniya materialov*, OGPU, Odessa.

Стаття надійшла до редакції 24 листопада 2017 р.