

## Теоретические исследования вероятности заклинивания твердых частиц при шлифовании

*Изложен механизм образования микропрофиля шлифованной поверхности с учетом влияния твердых частиц, содержащихся в смазочно-охлаждающих жидкостях. Исследована вероятность заклинивания абразивных частиц в зоне контакта шлифовального круга с поверхностью детали. Установлено, что для определения вероятности события, когда частица, попавшая вместе с жидкостью в зону контакта, оставляет след-царапину на поверхностном слое, следует принять во внимание, что возможны три взаимных расположения твердой частицы в зоне контакта шлифовального круга с поверхностью детали. Исследованиями установлено, что твердая частица, попавшая вместе с жидкостью в зону контакта, оставляет след-царапину на поверхности в том случае, когда размеры частицы равны или несколько превышают расстояние от поверхности детали до выступов на поверхности шлифовального круга. Исследования позволяют математически определить вероятность заклинивания твердых частиц в зоне контакта шлифовального круга с поверхностью шлифуемой детали.*

**Ключевые слова:** абразивные частицы; микропрофиль; смазочно-охлаждающие жидкости; вероятность; след-царапина; заклинивание; зона контакта.

Влияние твердых частиц, содержащихся в смазочно-охлаждающих жидкостях (СОЖ), на поверхностный слой при шлифовании исследовалось в ряде работ [1, 6, 8, 9, 10]. Однако, механизм образования микропрофиля шлифованной поверхности с учетом влияния твердых частиц, содержащихся в СОЖ, исследован недостаточно. Известно, что металлические частицы шлама, попавшие вместе с жидкостью в зону контакта абразивных зерен круга с поверхностью заготовки, деформируются сами и оказывают определенное влияние на деформацию материала обрабатываемой поверхности. Абразивные частицы шлама практически не деформируются, а, вступая в силовой контакт, в процессе шлифования как бы «удлиняя» абразивные зерна на поверхности круга и участвуя в единичных актах резания, внедряются в обрабатываемую поверхность, оставляя следы воздействия на поверхностном слое детали, которые приводят к росту шероховатости. Однако, не все абразивные частицы, содержащиеся в шламе, оставляют следы-царапины на поверхностном слое, а только заклинившиеся. Поэтому целью данного исследования являются теоретические исследования вероятности заклинивания абразивных частиц в зоне контакта шлифовального круга с поверхностью детали.

Для определения вероятности события, когда частица, попавшая вместе с жидкостью в зону контакта, оставляет след-царапину на поверхностном слое, следует принять во внимание, что возможны три взаимных расположения твердой частицы в зоне контакта шлифовального круга с поверхностью детали [4, с. 106; 5 с. 20]:

I. Размеры частицы достаточно большие, однако, существенно меньше расстояния между поверхностью связки и поверхностью детали; потоком СОЖ такая частица по каналам между абразивными зёрнами выносится из зоны контакта. При этом не исключается вероятность заклинивания частицы в последующем сечении контакта шлифовального круга и поверхности детали.

II. Размеры твердой частицы меньше расстояния между выступающими на поверхности шлифовального круга абразивными зёрнами и поверхностью детали: частица не оставляет следа воздействия на поверхностном слое детали.

III. Размеры твердой частицы равны или несколько превышают расстояние от поверхности детали до выступов на поверхности шлифовального круга. В этом случае частица «заклинивает» между поверхностью шлифовального круга и деталью и оставляет след на поверхностном слое детали.

Схема воздействия твердой частицы на поверхностный слой в зоне контакта шлифовального круга с поверхностным слоем детали показана на рисунке 1.

Оценим вероятность «заклинивания» частицы при шлифовании с применением СОЖ, содержащей твердые частицы.

Вероятность такого события выражается интегралом [7]

$$P_3 = \int_0^{d_{\max}} P_h \cdot d \cdot h, \quad (1)$$

где  $P_h$  – вероятность заклинивания частицы размером  $h$ .

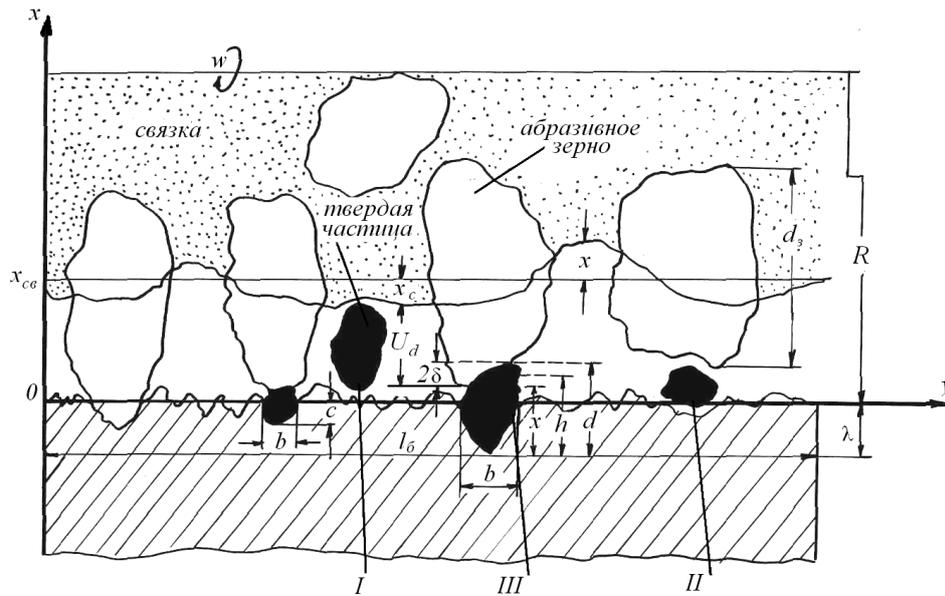


Рис. 1. Схема механизма воздействия твердых частиц на поверхностный слой

Интеграл берется по всем возможным размерам частиц, находящимся в СОЖ, то есть от 0 до  $d_{max}$ .

Чтобы произошло событие – «заклинивание» частицы размером  $h$ , должны одновременно произойти два случайных явления:

- диаметр частицы должен быть близок к  $h$ , приближаясь сверху ( $h \angle d \angle h + \delta$ );
- расстояние между выступающими вершинами абразивных зерен шлифовального круга и поверхностью детали также должно быть близким к  $h$ , приближаясь к нему снизу ( $h - \delta \angle x \angle h$ ).

Вероятность попадания твердой частицы размером  $d$  в интервал ( $h \angle d \angle h + \delta$ ), при контакте шлифовального круга с поверхностью детали, оценивается интегралом [7]:

$$P_1(h, h + \delta) = \int_h^{h+\delta} f(d) dd, \quad (2)$$

где  $f(d)$  – вероятность распределения размеров твердых частиц, содержащихся в СОЖ.

Вероятность того, что случайная величина размера твердой частицы примет значение  $x$  в интервале ( $h - \delta \angle x \angle h$ ) оценивается интегралом:

$$P_2(h - \delta, h) = \int_{h-\delta}^h f(x) dx, \quad (3)$$

где  $f(x)$  – вероятность распределения положений вершин абразивных зерен на рабочей поверхности шлифовального круга.

Тогда вероятность заклинивания частицы размером  $h$  оценивается произведением вероятностей  $P_1$  и  $P_2$ :

$$P_h = P_1(h, h + \delta) P_2(h - \delta, h) = \int_h^{h+\delta} f(d) dd \cdot \int_{h-\delta}^h f(x) dx \quad (4)$$

Плотность вероятности распределения положений вершин абразивных зерен на рабочей поверхности шлифовального круга описывается следующей зависимостью [3]:

$$f(x) = \int_{d_{3min}}^{d_{3max}} f(U_d) \cdot f(d_3) dd_3 \cdot \int_{-(d_3-x)}^x f(x_c) dx_c, \quad (5)$$

где  $d_3$  – текущий размер абразивного зерна, причем над связкой круга выступают зерна размером от  $d_{3min}$  до  $d_{3max}$ ;  $f(d_3)$  – плотность распределения диаметральных размеров абразивных зерен;  $U_d$  – величина

выступления зерна размером  $d_3$  над связкой;  $f(U_d)$  – плотность вероятности величины  $U_d$ ;  $f(x)$  – плотность вероятности распределения ординат неровностей связки относительно ее среднего уровня.

Плотность вероятности распределения диаметральных размеров проекций абразивных зерен на плотность подчиняется нормальному закону распределения с математическим ожиданием  $d_0$  и средним квадратичным отклонением  $\sigma_d$  [2]:

$$f(d_3) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_d} \exp\left[-\frac{(d_3 - d_0)^2}{2\sigma_d^2}\right], \quad (6)$$

где  $d_0$  – математическое ожидание диаметральных размеров;  $\sigma_d$  – среднее квадратичное отклонение распределения диаметральных размеров абразивных зерен.

Каждое абразивное зерно, независимо от другого, может выступать над связкой на различную величину ( $d_3 \geq U_d \geq 0$ ) с равной вероятностью. Поэтому

$$f(U_d) = \begin{cases} \frac{1}{d_3}, & \text{при } 0 \leq U_d \leq d_3 \\ 0, & \text{при } U_d < 0; \dots; U_d > d_3 \end{cases} \quad (7)$$

Распределение ординат неровностей связки инструмента согласно центральной предельной теореме теории вероятностей должно также приближаться к нормальному [7]:

$$f(x_c) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_c} \cdot \exp\left[-\frac{x_c^2}{2\sigma_c^2}\right], \quad (8)$$

где  $x_c$  – расстояние от средней поверхности связки;  $\sigma_c$  – среднее квадратичное отклонение ординат неровностей связки.

Подставляя выражения (6), (7) и (8) в (5) получим:

$$f(x) = \frac{1}{2\pi\sigma_c\sigma_d} \int_0^\infty \frac{1}{d_3} \cdot \exp\left[-\frac{(d_3 - d_0)^2}{2\sigma_d^2}\right] dd_3 \cdot \int_{-(d_3-x)}^x \exp\left[-\frac{x_c^2}{2\sigma_c^2}\right] dx_c. \quad (9)$$

Введем обозначения:

$$\begin{aligned} \frac{x_c}{\sigma_c} = U, \quad \text{откуда следует} \quad x_c = \sigma_c U; \quad dx_c = \sigma_c dU; \\ \frac{d_3 - d_0}{\sigma_d} = t, \quad \text{откуда следует} \quad d_3 = \sigma_d t + d_0; \quad dd_3 = \sigma_d dt; \end{aligned} \quad (10)$$

После соответствующих подстановок и преобразований, с учетом введенных обозначений (10), получим:

$$f(x) = \frac{1}{2\pi\sigma_d} \int_{-\frac{d_3}{\sigma_d} t + \frac{d_0}{\sigma_d}}^\infty \frac{e^{-\frac{t^2}{2}}}{\sigma_d} dt \cdot \int_{-\frac{\sigma_c}{d_0}(1 + \frac{\sigma_d}{d_0} \frac{x}{d_0})}^{\frac{x}{\sigma_c}} e^{-\frac{U^2}{2}} dU. \quad (11)$$

Плотность вероятности распределения размеров твердых частиц, содержащихся в СОЖ при шлифовании, удовлетворяет логарифмически нормальному распределению:

$$f(d) = \frac{1}{d\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(\ln d - m)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (12)$$

где  $d$  – максимальный размер сечения твердой частицы;  $m$  и  $\sigma$  – параметры логарифмически нормального распределения.

Подставляя выражение для вероятности заклинивания частицы размером  $h$  в формулу (1), получим вероятность заклинивания твердых частиц в зоне контакта шлифовального круга и детали:

$$P_3 = \frac{1}{\sqrt{8\pi^3} \cdot \sigma \cdot \sigma_d} \int_0^{d_{\max}} \left\{ \int_h^{h+\sigma} \frac{1}{d} \exp\left[-\frac{(\ln d - m)^2}{2\sigma^2}\right] dd \cdot \int_{h-d}^h \left[ \int_{\frac{d_3}{\sigma_d} t + \frac{d_0}{\sigma_d}}^{\infty} \frac{1}{d_0} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt \cdot \int_{\frac{\sigma_c}{d_0} \left(1 + \frac{\sigma_d}{d_0} \frac{x}{d_0}\right)}^{\frac{x}{\sigma_c}} \exp\left(-\frac{U^2}{2}\right) dU \right] dx \right\} dh, \quad (13)$$

где  $2\sigma$  – длина интервала размеров твердых частиц, на котором происходит заклинивание.

#### Выводы:

1. Твердая частица, попавшая вместе с жидкостью в зону контакта, оставляет след-царапину на поверхности в том случае, когда размеры частицы равны или несколько превышают расстояние от поверхности детали до выступов на поверхности шлифовального круга.

2. Заклинивание твердой частицы размером  $h$  произойдет в том случае, если диаметр частицы приближается к размеру  $h$  сверху, а расстояние между выступающими вершинами абразивных зерен шлифовального круга и поверхностью детали будет близким размеру  $h$ , приближаясь к нему снизу.

3. Полученная зависимость (13) позволяет определить вероятность заклинивания твердых частиц в зоне контакта шлифовального круга с поверхностью шлифуемой детали.

#### Список использованной литературы:

1. Голубев С.С. Об образовании микронеровностей при наружном круглом шлифовании / С.С. Голубев // Конструирование и технология в тяжелом машиностроении. – Свердловск, 1966. – С. 27–31.
2. Королев А.В. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке / А.В. Королев. – Саратов, 1975. – 191 с.
3. Королев А.В. Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки / А.В. Королев, Ю.К. Новоселов. – Саратов, 1987. – 160 с.
4. Молчанов В.Ф. Вероятностный подход к образованию шероховатости поверхностей при окончательной обработке / В.Ф. Молчанов // Системные технологии. – 2001. – № 2. – С. 106–110.
5. Молчанов В.Ф. Дослідження впливу твердих часток на шорсткість поверхонь при шліфуванні методами теорії ймовірності / В.Ф. Молчанов // Дніпродзержинський державний технічний університет : зб. наук. праць. – Кам'янське : ДДТУ, 2016. – № 1. – С. 20–24.
6. Полянсков Ю.В. К методике исследования эффективной очистки СОЖ от механических примесей при абразивной обработке / Ю.В. Полянсков, Е.А. Карев // Ульяновский политехнический институт. Серия : Труды института. – Куйбышев, 1976. – № 1. – С. 46–54.
7. Румишинский Л.З. Элементы теории вероятностей / Л.З. Румишинский. – М. : Наука, 1976. – 240 с.
8. Степанов М.С. Влияние механических примесей, содержащихся в СОЖ, на структуру и микротвердость поверхностного слоя шлифованных деталей / М.С. Степанов, Н.С. Шумакова // Смазочно-охлаждающие технологические средства в процессах абразивной обработки. – Ульяновск, 1988. – С. 78–84.
9. Худобин Л.В. Влияние загрязнения СОЖ отходами шлифования на пригообразование / Л.В. Худобин, Е.П. Гульнов // Вестник машиностроения. – 1978. – № 1. – С. 67–68.
10. Яцерицын П.И. Исследование механизма образования шлифованных поверхностей и их эксплуатационных свойств : дис. ... д-ра техн. наук / П.И. Яцерицын. – Минск, 1962. – 315 с.

#### References:

1. Golubev, S.S. (1966), «Ob obrazovanii mikronerovnostej pri naruzhnom kruglom shlifovanii», *Konstruirovaniye i tekhnologiya v tyazhelom mashinostroyenii*, Sverdlovsk, pp. 27–31.
2. Korolev, A.V. (1975), *Issledovanie processov obrazovaniya poverhnostej instrumenta i detali pri abrazivnoj obrabotke*, Saratov, p. 191.

3. Korolev, A.V. and Novoselov, Ju.K. (1987), *Teoretiko-veroyatnostnye osnovy abrazivnoj obrabotki*, Saratov, p. 160.
4. Molchanov, V.F. (2001), «Veroyatnostnyj podhod k obrazovaniyu sherohovatosti poverhnostej pri okonchatel'noj obrabotki», *Sistemnye tekhnologii*, Vol. 2, pp. 106–110.
5. Molchanov, V.F. (2016), «Doslidzhennya vplivu tverdih chastok na shorstkist' poverhon' pri shlifuvanni metodami teorii jmovirnosti», *Dniprodzerzhins'kij derzhavnyj tekhnichnyj universitet*, zbirnik naukovih prac', Vol. 1, DDTU, Kam'jans'ke, pp. 20–24.
6. Polyanskov, Yu.V. and Karev, E.A. (1976), «K metodike issledovaniya ehffektivnoj ochistki SOZH ot mekhanicheskikh primesej pri abrazivnoj obrabotke», *Ul'yanovskij politekhnicheskij institut*, Serija *Trudy instituta*, Vol. 1, Kujbyshev, pp. 46–54.
7. Rumshinskij, L.Z. (1976), *Elementy teorii veroyatnostej*, Nauka, Moskva, 240 p.
8. Stepanov, M.S. and Shumakova, N.S. (1988), «Vliyanie mekhanicheskikh primesej, sodержashchihsya v SOZH, na strukturu i mikrotverdost' poverhnostnogo sloya shlifovannyh detalej», *Smazochno-ohlazhdayushchie tekhnologicheskie sredstva v processah abrazivnoj obrabotki*, Ul'yanovsk, pp. 78–84.
9. Hudobin, L.V. and Gul'nov, E.P. (1978), «Vliyanie zagryazneniya SOZH othodami shlifovaniya na prizhogoobrazovanie», *Vestnik mashinostroeniya*, Vol. 1, pp. 67–68.
10. Yashchericyn, P.I. (1962), «Investigation of the mechanism of formation of polished surfaces and their operational properties», diss. of dokt. tekhn. nauk, Minsk, 315 p.

**Молчанов Віталій Федорович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент Дніпровського державного технічного університету, м. Кам'янське (Дніпродзержинськ).

Наукові інтереси:

- дослідження впливу технологічних рідин на процеси обробки інструментальних матеріалів шліфуванням;
- впровадження ресурсозберігаючих технологій для забезпечення екологічної чистоти процесів очистки технологічних середовищ в системах експлуатації мастильно-охолоджуючих рідин металорізальних верстатів для навколишнього середовища.

E-mail: v\_molchanov@ukr.net.

Статья поступила в редакцию 02.10.2017.