УДК 621.787.4

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ АНТИФРИКЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ КОЛЛЕКТОРА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ПРОКАТКЕ АБРАЗИВНОЙ ЛЕНТЫ

© 2026 А.В. Королев, А.А. Королев, В.В. Жалнин

Саратовский государственный технических университет имении Гагарина Ю.А.,
г. Саратов, Россия

Статья поступила в редакцию 31.01.2026

В статье рассматривается процесс формирования графитового антифрикционного покрытия на поверхности коллектора, образованного дискретно расположенными микровпадинами, заполненными графитом. Микровпадины образуются в результате прокатки шлифовальной ленты вдоль поверхности коллектора, при этом лента прижимается к обрабатываемой поверхности металлическим валком. Приведена математическая модель формирования поверхности микровпадин, оставленных абразивными зернами ленты после прокатки. Также представлены зависимости площади и числа микровпадин от зернистости шлифовальной ленты и числа проходов при накатке.

Ключевые слова: микроуглубления, коллектор, математическая модель, площадь микроуглублений, число микроуглублений.

DOI: 10.37313/1990-5378-2026-28-2(2)-326-332
EDN: EYVMFE

ВВЕДЕНИЕ

Известно множество способов и устройств [1-6 и др.] для формирования направленного микрорельефа на поверхностях деталей. Но наиболее эффективными из них являются способы образования микроуглублений с замкнутым контуром, так как они надежно удерживают смазку. Одним из значимых исследований процесса формирования микроуглублений с замкнутым контуром представлено в работах [8-13]. В этих работах раскрывается механизм образования серповидного микрорельефа на цилиндрической поверхности детали вибрационными резанием. Предложенная форма микрорельефа весьма эффективна в случаях применения жидкой смазки. Но при использовании твердой смазки типа графита требуется микрорельеф с шероховатой поверхностью микроуглублений, так как шероховатая поверхность более надежно удерживает твердую смазку. К тому же для нанесения микроуглублений требуется простой в использовании и высокопроизводительный способ. Указанным требованиям в полной мере соответствует рассматриваемый ниже способ нанесения микроуглублений на поверхности коллектора прокаткой абразивной ленты [14].

Сущность предлагаемого способа поясняется рисунком 1.

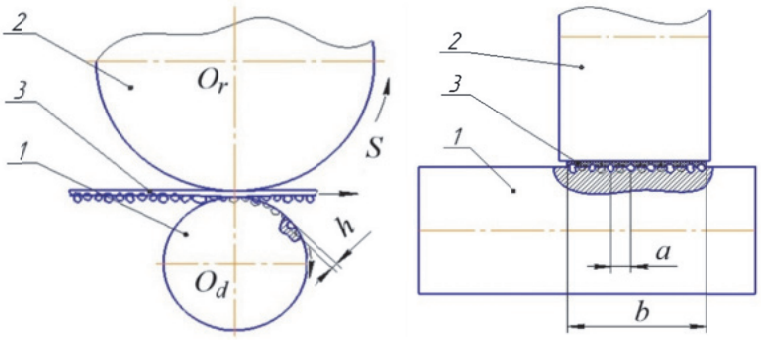

Рис. 1 – Схема процесса формирования стохастических микроуглублений шлифовальной лентой

Инструмент в виде шлифовальной ленты 3, (ГОСТ 5009-82) располагают между роликом 2 и коллектором 1 и прижимают роликом 2 к поверхности коллектора 1. Затем осуществляют протягивание инструмента 3 с подачей S между коллектором 1 и роликом 2, которые при этом свободно вращаются вокруг своих осей. Абразивные зерна инструмента 3 создают на поверхности коллектора стоха-

Королев Альберт Викторович, доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения»
Королев Андрей Альбертович, доктор технических наук, профессор кафедры «Информационное право и цифровые технологии»
Жалнин Владислав Валерьевич, аспирант. E-mail: zhalninvv97@gmail.com

стические углубления (микровпадины) со случайными значениями глубины h и шага a. В процессе работы электродвигателя продукты износа щеток плотно заполняют микровпадины, фактически создавая антифрикционное покрытие, которое уменьшает износ коллектора.

Как видно, способ очень прост в осуществлении, не требует сложного оборудования и оснастки. Кроме того, в зависимости от давления ролика абразивные зерна могут оставлять на поверхности заготовки более глубокие отпечатки, чем известными способами, что расширяет технологические возможности способа обработки и позволяет повысить износостойкость поверхности.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Задачей математического моделирования является определение аналитической зависимости математического ожидания суммарной площади микроуглублений, оставленных абразивными зернами на цилиндрической поверхности коллектора после его свободной прокатки инструментом в виде шлифовальной ленты, от множества случайных и неслучайных факторов. В общем виде искомая зависимость выглядит следующим образом:

$$S_o = k_j \cdot \sum_{i=1}^{c_o} s_i[d_o, d_n, d_v, a_m(P, d_o, z_o, Hv, D, D_v L, K_s), u(E_l, E_z, \mu_l, \mu_z \lambda, r_z, a_z p_z)], \quad (1)$$

где S_o – математическое ожидание суммарной площади микроуглублений на поверхности коллектора, $мм^2$; k_j – коэффициент перекрытия микроуглублений при числе проходов инструмента *j*; h_m –максимально возможная глубина микроуглубления, мм,; *P* – сила прижима инструмента к коллектору валком, Н; d_0 – математическое ожидание диаметра абразивных зерен инструмента, мм; d_n и d_v – минимальный и максимальный диаметры абразивных зерен на поверхности инструмента, мм; z_o – плотность расположение микроуглублений на глубине a_i от поверхности коллектора, шт/мм^2; K_s – коэффициент структуры абразивного инструмента; k_z – коэффициент пропорциональности между шириной b_z и глубиной a_z микроуглубления ($k_z \cong 3{,}8$); r_z – радиус округления рабочей части зерна, мм; s_i – площадь поверхности *i*-ого микроуглубления, $мм^2$; *D u* D_v – соответственно диаметр коллектора и валка, мм; *L* – ширина инструмента, мм; *Hv* – микротвердость поверхностного слоя коллектора, МПа; *u* – упругая деформация зерен в подложке инструмента, мм; p_z – сила, действующая на абразивное зерно, Н; E_1 и E_2 – модули упругости материалов подложки и зерна, МПа; μ_1 и μ_2– коэффициенты Пуассона материалов подложки и зерна; λ – толщина подложки, мм.

Сформулированы и обоснованы принятые в работе исходные данные и допущения: 1. Стохастический микрорельеф, полученный накаткой шлифовальной лентой, состоит из множества микроуглублений со случайной глубиной и случайно распределенных вдоль поверхности изделия. 2. Сила вдавливания абразивных зерен в обрабатываемую поверхность пропорционально площади отпечатка: $p_z = Hv \cdot s_i$. 3. Величина исходной шероховатости поверхности заготовки не учитывается, так как она значительно меньше глубины образуемого стохастического микрорельефа. 4. Соотношения, принятые из технической литературы [1]:

$$r_z = \frac{k_z^2 \cdot a_z}{8}; z(x) = 0{,}24 \frac{K_s}{d_o^{4{,}75}} x^{2{,}75}, \; 0 \le x \le 0{,}2d_o, \quad (2)$$

где x – расстояние от вершины наиболее выступающего над связкой зерна, мм; z(x) -число вершин зерен на уровне x на единице поверхности инструмента, шт./мм^2.

5. Плотность вероятностей распределения диаметров рабочих зерен, оставивших свой отпечаток на поверхности коллектора, равна [15]:

$$f(d) = \frac{1}{\sqrt{2p} \cdot y \cdot F(d_n, d_v)} e^{-\frac{(d-d_0)^2}{2y^2}} \text{ при } d_n \le d \le d_v, \quad (3)$$

где σ – среднее квадратическое отклонение размеров зерен, мм; $F(d_n, d_v)$ – вероятность нахождения зерен в порошке с размерами в пределах от минимального d_n до максимального d_v; 6. Сила вдавливания абразивных зерен в обрабатываемую поверхность не превышает значение, при котором они подвергаются хрупкому разрушению. 7. На основе решения контактной задачи Герца упругая деформация зерен в подложку инструмента под действием внешней силы равна:

$$u = \sqrt[3]{\frac{9p_z^2 \cdot 3^2}{16 r_z}} k(o), \quad (4)$$

где $\eta = (1-\mu_1^2)/E_1 + (1-\mu_2^2)/E_2$, мм^2/Н; $k(\xi)$ – поправочный коэффициент, зависящий от

соотношения толщины подложки λ и максимального радиуса a_z пятна контакта абразивного зерна со связкой ($o = a_z/\lambda$).

На рисунке 2 показана схема взаимодействия абразивных зерен инструмента с обрабатываемой поверхностью. Введем Декартовую систему координат, направив OX горизонтально вдоль перемещения шлифовальной ленты, OZ –в вертикальном направлении, OY – в продольном направлении поверхности коллектора (не показано).

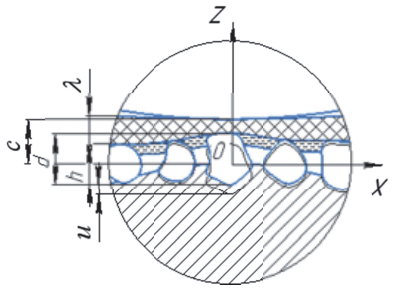

Рис. 2 – Рабочая зона процесса обработки

Исходя из соотношений (2) и учитывая малый размер площадки контакта, элементарная сила вдавливания абразивных зерен в поверхность коллектора равна:

$$dP = \frac{p}{4} \cdot k_z^2 \cdot Hv \cdot \frac{K_s}{d_o^{4,75}} \left(a_m - x^2 \cdot \frac{D + D_l}{D \cdot D_l}\right)^2 \cdot \left(x^2 \cdot \frac{D + D_l}{D \cdot D_l}\right)^{2,75} dxdy, \quad (5)$$

Интегрируя равенство (5) по переменным *x* и *y,* на площади F_k контакта инструмента с поверхностью коллектора, найдем:

$$dP = \frac{p}{4} \cdot k_z^2 \cdot Hv \cdot \frac{K_s}{d_o^{4,75}} \iint_{F_k} \left(a_m - x^2 \cdot \frac{D+D_l}{D \cdot D_l}\right)^2 \cdot \left(x^2 \cdot \frac{D+D_l}{D \cdot D_l}\right)^{2,75} dxdy,$$

где $F_k = \sqrt{a_m \frac{D D_l}{(D_k + D_l)}} \cdot L$, мм^2.

После интегрирования и преобразований, получим:

$$P = 3{,}45 \cdot 10^{-3} \cdot p \cdot k_z^2 \cdot Hv \cdot \frac{K_s}{d_0^{4,75}} a_m^{5.25} \sqrt{\frac{D \cdot D_l}{D + D_l}} \cdot L.$$

Из полученного равенства определим:

$$a_m = 2{,}95 \cdot \left(\frac{d_0^{4.75} \cdot P}{p \cdot k_z^2 \cdot Hv \cdot K_s \cdot L} \cdot \sqrt{\frac{D + D_l}{D \cdot D_l}}\right)^{\frac{1}{5,25}}, \quad (6)$$

Как следует из рисунка 2, расстояние между обрабатываемой поверхностью и поверхностью валка *c*, толщина подложки инструмента λ, диаметр абразивного *d* зерна, глубина микроуглубления a_z, и деформация зерна в подложке инструмента *u* образуют замкнутую размерную цепь, определяемую равенством:

$$c - d - \lambda + a_z + u = 0 \text{ при } d \geq c - \lambda. \quad (7)$$

Величина *u* определяется равенством (4). Подставив в это равенство значение r_z (2) и p_z, с учетом (2) получим:

$$u = 0{,}65 \sqrt[3]{p^2 \cdot k_z^2 \cdot H_v^2 \cdot з^2} \cdot a_z \cdot k(o), \quad (8)$$

Подставляя (8) в (7) и учитывая, что остаточная глубина микро-углубления $h = k_u a_z$, где k_u – коэффициент упругой деформации микроуглубления, найдем глубину микроуглубления:

$$h(d) = \frac{d - c + л}{\left(1 - 0{,}65 \sqrt[3]{p^2 \cdot k_z^2 \cdot H_v^2 \cdot з^2} \cdot k(o)\right) k_u} \text{ при } d \geq c - л, \quad (9)$$

В правой стороне равенства (9) имеется одна случайная величина – размер абразивного зерна *d* (3). Следовательно, величина *h* является случайной функцией от *d*. Найдем плотность вероятностей величины *h*.

Так как функция $h(d)$ монотонная на всем участке изменений величины d и дифференцируемая, то плотность вероятностей величины h находится по следующей формуле:

$$g(h) = f_k\left(\psi(h)\right) \cdot \left|\psi'(h)\right| \text{ при } 0 \leq h \leq h_m, \quad (10)$$

где $\psi(h)$ – функция, обратная по отношению к $h(d)$, мм; $\psi'(h)$ – производная функции $\psi(h)$; $f_k(\psi(h))$ – плотность вероятностей, определяемая (7), при подстановке в нее вместо значения d величины $\psi(h)$; $\frac{1}{мм}$ h_m – максимальная глубина микроуглубления, мм.

Используя (3) и (9), после преобразований получим:

$$f_h(h) = \frac{B}{\sqrt{2p}\cdot y \cdot F_h(a_m)} e^{-\frac{(hB+A-d_o)^2}{2\cdot y^2}} \text{ при } 0 \le h \le h_m, \quad (11)$$

где $B = \left(1 - 0{,}65\sqrt[3]{p^2 \cdot k_z^2 \cdot H_v^2 \cdot з^2} \cdot k(o)\right) k_u;\ A = c - \lambda;\ hm = (d - A)B;$

$$F_h(a_m) = \frac{1}{\sqrt{2p}y}\int_{d_v - a_m}^{d_v} exp\left(-\frac{(d-d_o)^2}{2y^2}\right) dd.$$

Математическое ожидание и дисперсия величины *h*:

$$h_o = \frac{y}{\sqrt{2p}F_h(a_m)}\left(e^{-\frac{(d_v - a_m - d_o)^2}{2y^2}} - e^{-\frac{(d_v - d_o)^2}{2y^2}}\right) + \frac{d_o - A}{B};$$

$$y_h^2 = \int_0^{h_m} (h - h_o)^2 \cdot f_h(h)dh, \quad (12)$$

Исходя из (2), площадь микроуглубления на обрабатываемой поверхности равна:

$$s = \frac{pk_z^2 k_u^2 h^2}{4}, \quad (13)$$

С учетом (10) плотность вероятностей распределения случайной величины *s* как функции от случайной величины *h*, определяется равенством:

$$f_s(s) = \frac{B}{2\sqrt{2pC\cdot s}\cdot y \cdot F_h(a_m)} e^{-\frac{\left(\sqrt{\frac{s}{C}}B + A - d_o\right)^2}{2\cdot y^2}} \text{ при } 0 \le s \le C \cdot h_m, \quad (14)$$

где $C = pk_z^2 k_u^2/4$.

Математическое ожидание и дисперсия величины *s:*

$$s_o = \frac{pk_z^2 k_u^2 h_o^2}{4};$$

$$y_s^2 = \int_0^{s_m} (s - s_o)^2 f_s(s)ds, \quad (15)$$

где $s_m = C \cdot h_m^2$.

Теперь можно найти сумму площадей микроуглублений на единице поверхности коллектора. Величина z, как и величина s (15), являются независимыми случайными величинами. Распределение числа микроуглублений по обрабатываемой поверхности соответствует закону Пуассона. Для Пуассоновского распределения:

$$S_o = s_o \cdot z_a;$$
$$y_{So}^2 = s_o^2 \cdot z_a, \quad (16)$$

где $S_o y_{So}^2$ – соответственно математическое ожидание площади микроуглублений на единице поверхности коллектора, и дисперсия мм^2; z – среднее число микроуглубления на единице поверхности коллектора, шт.

В соответствии с (2) $z_a = 0{,}24K_s \cdot h_m^{2,75}/d_o^{4,75}$

Подставляя в (16) значения s_o и z_o, получим:

$$S_o = \frac{0{,}06p}{d_o^{4,75}} K_s \cdot k_z^2 \cdot k_u^2 \cdot h_m^{2,75} \cdot h_o^2;$$

$$y_s^2 = \frac{0{,}24p^2 K_s}{16 d_o^{4,75}} k_z^4 \cdot k_u^4 \cdot h_m^{2,75} \cdot h_o^4, \quad (17)$$

где h определяется (12), а h_m можно найти из равенства (9):

$$h_m = \frac{d_v - c + л}{\left(1 - 0{,}65\sqrt[s]{p^2 \cdot k_z^2 \cdot H_v^2 \cdot з^2} \cdot k(o)\right) k_u}, \tag{18}$$

Если накатка микроуглублений осуществляется не за один оборот заготовки, то надо учесть, что при последующих проходах часть микроуглублений попадет в предыдущие микроуглубления. Поэтому фактическая площадь и число микроуглублений на единице поверхности коллектора после j-ого прохода:

$$S_j = S_{j-1} + \left(S_0 - S_0 \cdot S_{j-1}\right) = 1 - (1 - S_o)^j, \tag{19}$$

$$z_j = z_{j-1} + \left(z_o - z_o \cdot S_{j-1}\right), \tag{20}$$

где S_j **и** z_j – математическое ожидание доли площади и числа микроуглублений на поверхности коллектора после j-ого прохода на единице поверхности коллектора.

Как видно, площадь и число микроуглублений на поверхности коллектора зависят от числа проходов и множества других факторов, которые составляют равенства (17) и (18).

На основе полученных математических моделей разработан алгоритм и протестирована на языке программирования MathCad система компьютерного имитационного моделирования процесса формирования микроуглублений на поверхности коллекторов электродвигателей накаткой шлифовальной лентой, и выполнен компьютерного эксперимента, который выявил и наглядно представил зависимости вероятностных параметров микроуглублений на поверхности коллектора от зернистости абразивного инструмента и числа проходов шлифовальной ленты (рис. 3).

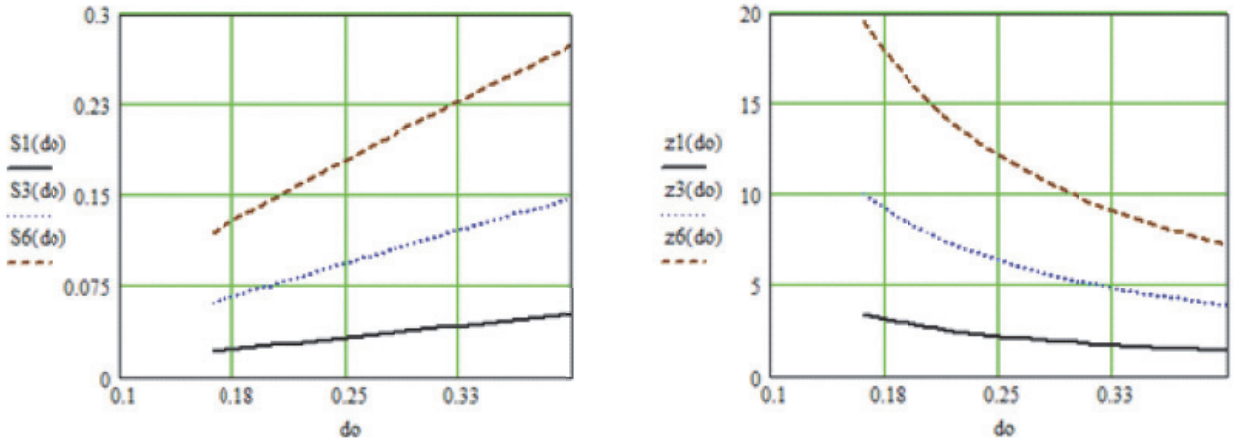

Рис. 3 – Зависимость доли суммарной площади S, и числа z микроуглублений на единице обрабатываемой поверхности от зернистости d_o, мм инструмента при одном $S1, z1$, трех $S3, z3$ и шести $S6, z6$ проходах

Как видно из рисунка 3, с увеличением зернистости инструмента доля площади микроуглублений от зерен возрастает, а число микроуглублений уменьшается. Но так как площадь впадины имеет квадратичную зависимость от ее глубины, то в целом зависимость доли микроуглублений на поверхности коллектора носит возрастающий характер.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен способ формирования антифрикционного покрытия на поверхности коллектора электродвигателей, который состоит из дискретно расположенный микроуглублений, образуемых прокаткой поверхности абразивной лентой, заполненных твердой смазкой в виде графита. Математическое моделирование процесса формирования таких микроуглублений показало, что площадь и число микроулублений на поверхности коллектора зависят от множества случайных и неслучайных факторов, основными из которых являются зернистость инструмента, сила его прижима к обрабатываемой поверхности и число проходов. Наглядно показано, что с увеличением числа проходов суммарная площадь микроуглублений возрастает, а число углублений уменьшается.

Выполненные исследования могут использоваться при разработке технологии формирования микроуглублений на поверхности коллекторов электродвигателе при их изготовлении и ремонте с целью повышения износостойкости коллекторной пары.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. с. 1466917 СССР, МПК B24B 39/04. Устройство для виброобкатывания / А. П. Бородин, Б. Н. Букин, Ю. Г. Шнейдер ; заявл. 05.01.1987 ; опубл. 23.03.1989, Бюл. № 11.
2. А. с. 1493444 СССР, МПК B24B 39/00. Способ образования поверхности трения / Ю. Г. Шнейдер, А. В. Радионенко, Я. С. Фельдман, А. П. Бородин ; заявл. 15.07.1987 ; опубл. 15.07.1989, Бюл. № 26.
3. Пат. 24410 Российская Федерация, МПК B24B 39/00. Устройство для чистовой обработки поверхностным пластическим деформированием сложно-фасонных поверхностей / В. М. Сорокин, В. В. Берглезов, Е. А. Тарасова, С. С. Танчук ; заявл. 11.02.2002 ; опубл. 10.08.2002, Бюл. № 22.
4. Пат. 64126 Российская Федерация, МПК B24B 39/00. Устройство для отделочно-упрочняющей обработки трущихся поверхностей деталей машин / В. М. Сорокин, А. В. Михеев, С. С. Танчук [и др.] ; заявл. 13.02.2007; опубл. 27.06.2007, Бюл. № 18.
5. Пат. 113686 Российская Федерация, МПК B24B 39/00. Устройство для вибрационной обработки поверхностей деталей / Н. В. Ермольчева, Б. С. Орлов, А. В. Королев ; заявл. 11.08.2011 ; опубл. 27.02.2012, Бюл. № 6.
6. А. с. 1713783 СССР, МПК B24B 21/02. Устройство для ленточного шлифования внутренней поверхности / заявл. 02.04.1990 ; опубл. 23.02.1992, Бюл. № 7.
7. Пат. 220184 Российская Федерация, МПК B24B 21/00, B24B 39/04. Устройство для формирования микрорельефа поверхности трения / А. В. Королев, А. Ю. Фетисов, В.В. Жалнин [и др.] ; заявл. 12.05.2023 ; опубл. 30.08.2023, Бюл. № 25.
8. ГОСТ 5009-82. Шкурка шлифовальная тканевая и бумажная. Введ. 1983-01-01. – М.: Издательство стандартов, 2023. – 7 с.
9. *Ермольчева, Н.В.* К вопросу технологического обеспечения микрорельефа поверхностей деталей, обработанных дискретным вибрационным резанием / Б.С. Орлов, А.В. Королев, Н.В. Ермольчева // Вестник Саратовского государственного технического университета. – Саратов, 2010. – № 4 (51). – Выпуск 3. – С. 43-47.
10. *Ермольчева, Н.В.* Устройство для дискретного вибрационного резания с созданием регулярного микрорельефа с требуемыми параметрами / Н.В. Ермольчева, А.В. Королев, Б.С. Орлов // Вестник Саратовского государственного технического университета. – Саратов, 2011. – № 2 (56). – Выпуск 2. – С. 52-57.
11. *Ермольчева, Н.В.* Оценка маслоемкости колец шарикоподшипников, обработанных дискретным вибрационным резанием / Н.В. Ермольчева, Б.С. Орлов, А.А. Скрипкин // Авиационная промышленность. – 2011. – № 3. – С. 25-28.
12. *Ермольчева, Н.В.* О влиянии основных факторов дискретного вибрационного резания на объемные характеристики микрорельефа поверхности / Н.В. Ермольчева, А.В. Королев, Б.С. Орлов, И.В. Родионов // Вестник Саратовского государственного технического университета. – Саратов, 2011. – № 3 (58). – Выпуск 2. – С. 31-34.
13. *Ермольчева, Н.В.* О влиянии конструктивных элементов устройства для дискретного вибрационного резания на форму и параметры микрорельефа поверхности / Н.В. Ермольчева, А.В. Королев, Б.С. Орлов, И.В. Родионов // Вестник Саратовского государственного технического университета. – Саратов, 2011. – № 3 (58). Выпуск 2. – С. 34-38.
14. *Ермольчева, Н.В.* К оценке площади поверхности микролунок частично регулярного микрорельефа при дискретном вибрационном резании / Н.В. Ермольчева, Б.С. Орлов, А.В. Королев, А.А. Скрипкин // Авиационная промышленность. – М., 2013. – № 3. – С. 24-27.
15. *Королев, А.В.* Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки / А.В. Королев, Ю.К. Новоселов. – Саратов: Изд-во СГТУ, 1989. – 160 с.

MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESS OF FORMING ANTI-FRICTION COATING ON THE SURFACE OF COMMUTATORS OF ELECTRIC MOTORS USING ABRASIVE BELT ROLLING

© 2026 A.V. Korolev, A.A. Korolev, V.V. Zhalnin

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia

The article examines the process of forming a graphite anti-friction coating on the surface of the commutator, formed by discretely located micropits filled with graphite. The micropits are created because of abrasive belt rolling along the surface of the commutator, with the belt being pressed against the working surface by a metal roller. A mathematical model for the formation of the surface of micropits left by abrasive grains of the belt after rolling is presented. The dependencies of the area and number of micropits on the grit size of the abrasive belt and the number of passes during rolling are also provided.
Keywords: micropits, commutator, mathematical model, micropit area, number of micropits.

DOI: 10.37313/1990-5378-2026-28-2(2)-326-332
EDN: EYVMFE

REFERENCES

1. A. s. 1466917 SSSR, MPK B24B 39/04. Ustrojstvo dlya vibroobkatyvaniya / A. P. Borodin, B. N. Bukin, Yu. G. Shnejder; zayavl. 05.01.1987 ; opubl. 23.03.1989, Byul. № 11.

2. A. s. 1493444 SSSR, MPK B24B 39/00. Sposob obrazovaniya poverhnosti treniya / Yu. G. Shnejder, A. V. Radionenko, Ya. S. Fel'dman, A. P. Borodin ; zayavl. 15.07.1987 ; opubl. 15.07.1989, Byul. № 26.
3. Pat. 24410 Rossijskaya Federaciya, MPK B24B 39/00. Ustrojstvo dlya chistovoj obrabotki poverhnostnym plasticheskim deformirovaniem slozhno-fasonnyh poverhnostej / V. M. Sorokin, V. V. Berglezov, E. A. Tarasova, S. S. Tanchuk ; zayavl. 11.02.2002 ; opubl. 10.08.2002, Byul. № 22.
4. Pat. 64126 Rossijskaya Federaciya, MPK B24B 39/00. Ustrojstvo dlya otdelochno-uprochnyayushchej obrabotki trushchihsya poverhnostej detalej mashin / V. M. Sorokin, A. V. Miheev, S. S. Tanchuk [i dr.] ; zayavl. 13.02.2007 ; opubl. 27.06.2007, Byul. № 18.
5. Pat. 113686 Rossijskaya Federaciya, MPK B24B 39/00. Ustrojstvo dlya vibracionnoj obrabotki poverhnostej detalej / N. V. Ermol'cheva, B. S. Orlov, A. V. Korolev ; zayavl. 11.08.2011 ; opubl. 27.02.2012, Byul. № 6.
6. A. s. 1713783 SSSR, MPK B24B 21/02. Ustrojstvo dlya lentochnogo shlifovaniya vnutrennej poverhnosti / zayavl. 02.04.1990 ; opubl. 23.02.1992, Byul. № 7.
7. Pat. 220184 Rossijskaya Federaciya, MPK B24B 21/00, B24B 39/04. Ustrojstvo dlya formirovaniya mikrorel'efa poverhnosti treniya / A. V. Korolev, A. Yu. Fetisov, V.V. Zhalnin [i dr.] ; zayavl. 12.05.2023 ; opubl. 30.08.2023, Byul. № 25.
8. GOST 5009-82. Shkurka shlifoval'naya tkanevaya i bumazhnaya. Vved. 1983-01-01. – M.: Izdatel'stvo standartov, 2023. – 7 s.
9. *Ermol'cheva, N.V.* K voprosu tekhnologicheskogo obespecheniya mikrorel'efa poverhnostej detalej, obrabotannyh diskretnym vibracionnym rezaniem / B.S. Orlov, A.V. Korolev, N.V. Ermol'cheva // Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – Saratov, 2010. – № 4 (51). – Vypusk 3. – S. 43-47.
10. *Ermol'cheva, N.V.* Ustrojstvo dlya diskretnogo vibracionnogo rezaniya s sozdaniem regulyarnogo mikrorel'efa s trebuemymi parametrami / N.V. Ermol'cheva, A.V. Korolev, B.S. Orlov // Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – Saratov, 2011. – № 2 (56). – Vypusk 2. – S. 52-57.
11. *Ermol'cheva, N.V.* Ocenka masloemkosti kolec sharikopodshipnikov, obrabotannyh diskretnym vibracionnym rezaniem / N.V. Ermol'cheva, B.S. Orlov, A.A. Skripkin // Aviacionnaya promyshlennost'. – 2011. – № 3. – S. 25-28.
12. *Ermol'cheva, N.V.* O vliyanii osnovnyh faktorov diskretnogo vibracionnogo rezaniya na ob"emnye harakteristiki mikrorel'efa poverhnosti / N.V. Ermol'cheva, A.V. Korolev, B.S. Orlov, I.V. Rodionov // Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – Saratov, 2011. – № 3 (58). – Vypusk 2. – S. 31-34.
13. *Ermol'cheva, N.V.* O vliyanii konstruktivnyh elementov ustrojstva dlya diskretnogo vibracionnogo rezaniya na formu i parametry mikrorel'efa poverhnosti / N.V. Ermol'cheva, A.V. Korolev, B.S. Orlov, I.V. Rodionov // Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – Saratov, 2011. – № 3 (58). Vypusk 2. – S. 34-38.
14. *Ermol'cheva, N.V.* K ocenke ploshchadi poverhnosti mikrolunok chastichno regulyarnogo mikrorel'efa pri diskretnom vibracionnom rezanii / N.V. Ermol'cheva, B.S. Orlov, A.V. Korolev, A.A. Skripkin // Aviacionnaya promyshlennost'. – M., 2013. – № 3. – S. 24-27.
15. *Korolev, A.V.* Teoretiko-veroyatnostnye osnovy abrazivnoj obrabotki / A.V. Korolev, Yu.K. Novoselov. – Saratov: Izd-vo SGTU, 1989. – 160 s.

Albert Korolev, Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of «Machine Tool Technology».
Andrei Korolev, Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of «Information Law and Digital Technologies.
Vladislav Zhalnin, Graduate Student. E-mail: zhalninvv97@gmail.com