

УДК 621.7.09

ПАРАМЕТРЫ ДИСКРЕТНОГО МИКРОРЕЛЬЕФА ПРИ ЕГО НАКАТКЕ ШЛИФОВАЛЬНОЙ ЛЕНТОЙ

© 2025 В.В. Жалнин

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,
г. Саратов, Россия

Статья поступила в редакцию 21.04.2025

Показана зависимость доли поверхности микроуглублений, оставленных абразивными зернами на поверхности коллектора электродвигателя при накатке шлифовальной лентой, от зернистости шлифовальной ленты и числа проходов. Установлено, что при увеличении зернистости шлифовальной ленты и числа проходов доля площади микроуглублений на поверхности коллектора возрастает. Результаты исследования сопоставлены с расчетными значениями, полученными ранее путем математического моделирования процесса формирования микроуглублений шлифовальной лентой.

Ключевые слова: микроуглубления, коллектор, математическая модель, площадь микроуглублений, доверительные интервалы.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-3-200-205

EDN: SFWQMU

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что формирование микроуглублений на поверхности коллектора шлифовальной лентой обеспечивает многократное повышение износостойкости коллектора электрических машин [1]. Однако достигается это при определенном соотношении между площадью микроуглублений и площадью поверхности коллектора. Поэтому важной задачей при формировании микроуглублений является необходимость обеспечить требуемую долю площади микроуглублений на поверхности коллектора.

Анализ последних исследований и публикаций свидетельствует, что внедрение в поверхностный слой коллектора электрических машин графита существенно повышает его износостойкость. [1-6]. Например, в работе [2] насыщение углеродом поверхности коллектора осуществляется за счет электроискрового воздействия на поверхность коллектора графитовым электродом. В работах [3-6] поверхность коллектора насыщается углеродом за счет предварительного динамического воздействия на обрабатываемую поверхность инструментом, колеблющимся с ультразвуковой частотой, и подачи в зону обработки суспензии, состоящей из графита и керосина в соотношении один к пяти. В работах [7-9] предлагается предварительно создать на поверхности коллектора микроуглубления за счет накатки поверхности шлифовальной лентой, а затем при работе электродвигателя отходы от износа графитовых щеток будут заполнять микроуглубления и играть роль твердой смазки. Показано, что эффективность этого процесса во многом зависит от степени насыщения поверхностного слоя коллектора графитом. Поэтому следует регламентировать этот процесс. В работах [10,11] представлена математическая модель формирования микроуглублений на поверхности коллектора, которая позволяет прогнозировать процесс формирования микроуглублений. Данная модель требует уточнения и проверки достоверности, чему и посвящена данная статья.

Целью статьи является определение доли площади микроуглублений на поверхности коллектора при накатке шлифовальной лентой разной зернистости и с разным числом проходов и сопоставление полученных результатов с ранее выполненным математическим моделированием процесса формирования микроуглублений.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследований использовался коллектор высокоточного электродвигателя компании «Махон motor». Коллектор изготовлен из так называемой бескислородной меди М1. Накатку микроуглублений осуществляли на устройстве, описанном в [9] шлифовальной лентой ЛБ 1 6 x 330 15A KT SOL S W P12-32 ГОСТ Р 58860—2020 зернистостью Р12 и Р32. Для определения относительной площади микроуглублений на поверхности коллектора использован оптический стереоскопический микроскоп МБС-10, который обеспечивает детальное наблюдение поверхности благодаря своим оптическим характеристикам. На микроскопе МБС-10 делалась фотография по-

Жалнин Владислав Валерьевич, аспирант. E-mail: zhalninvv97@gmail.com

верхности коллектора. Далее эта фотография с помощью программы «ImageJ» переводилась в 8 бит формат, чтобы изображение было черно белым, где белый цвет – искомая поверхность. На белом фоне более четко видны черные углубления. Эта же программу использовалась для определения доли черного цвета на белом фоне, что и является долей микроуглублений. На каждом коллекторе на различных его участках выполнялось по три таких измерения, на основе которых определялось среднее значение и среднее квадратическое отклонение из трех измерений σ (мм).

Доверительный интервал результатов из трех указанных выше измерений определялся по критерию Стьюдента. Для этого по таблице Стьюдента с доверительной вероятностью 0,95 при числе степеней свободы $N - 1 = 2$ находился коэффициент Стьюдента, который для числа измерений $N = 3$, составлял $\beta = 4,3$. Тогда доверительный интервал равен:

$$\varepsilon = \frac{\beta \cdot \sigma}{\sqrt{N}} = 2,5 \cdot \sigma.$$

Границами доверительного интервала являются:

$$S_{max} = S + 0,5\varepsilon;$$

$$S_{min} = S - 0,5\varepsilon.$$

Результаты измерения могут использоваться для проверки адекватности математической модели формирования микроуглублений на поверхности коллектора накаткой шлифовальной лентой, ранее опубликованной в работах [10, 11]. Если вычисленное по математическим зависимостям значение относительной площади, занимаемой микроуглублениями, находится внутри доверительных границ, то вычисленное значение считается адекватным опытным данным. В противном случае, математическая модель признается не адекватной результатам опытов.

На рис. 1 показаны доля микроуглублений, полученных при накатке шлифовальной лентой зернистостью P12 при числе проходов, равным 3, границы доверительного интервала и вычисленная по представленным в работах [10, 11] математическим зависимостям.

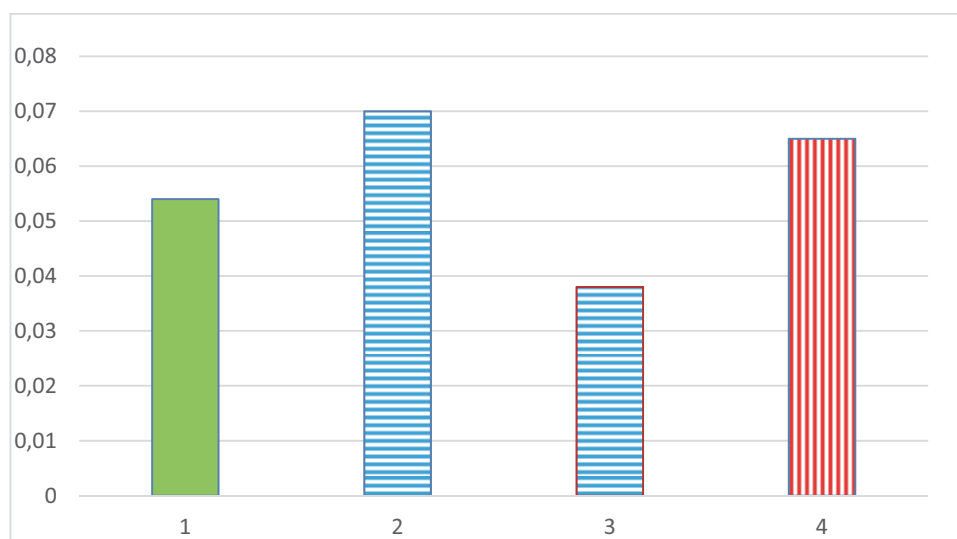


Рис. 1. Доля микроуглублений на поверхности коллектора при их формировании шлифовальной лентой зернистостью P12 при числе проходов 3:
1 – среднее замеренное значение, 2 и 3 – границы доверительного интервала,
4 – вычисленное по математической модели

Как видно из рис. 1, среднее значение доли микроуглублений на поверхности коллектора при формировании их шлифовальной лентой зернистостью P12 при числе проходов 3 составляет 0,05, а верхняя и нижняя границы доверительного интервала составляют 0,078 и 0,02 соответственно. Это невысокое значение доли микроуглублений, которое слабо влияет на износостойкость коллектора. Из графика 1 видно также, что вычисленное по математической модели значение доли площади, занимаемой микроуглублениями, находится между верхней и нижней границами доверительного интервала, поэтому вычисленное значение принимаем адекватным опытным данным.

На рисунке 2 показаны те же зависимости, но при числе проходов, равным 1.

Как видно из рис. 2, при одном проходе доля площади микроуглублений уменьшается почти в 2,5 раза, и примерно на столько же уменьшаются значения границ доверительного интервала. Вычисленное по математической модели значение доли площади, занимаемой микроуглублениями,

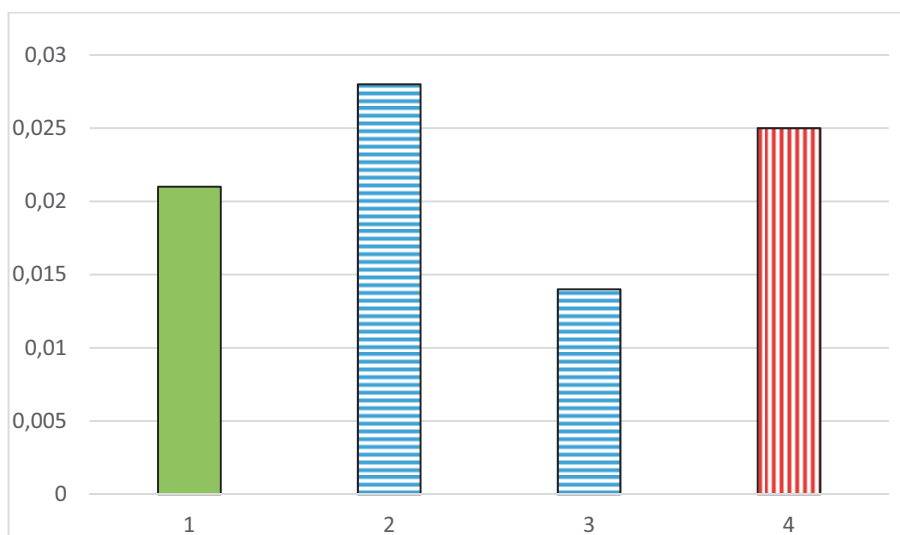


Рис. 2. Доля микроуглублений на поверхности коллектора при их формировании шлифовальной лентой зернистостью Р12 при числе проходов 6:

1 – среднее замеренное значение, 2 и 3 – границы доверительного интервала, 4 – вычисленное по математической модели

находится между верхней и нижней границами доверительного интервала, поэтому вычисленное значение принимаем адекватным опытными данным.

На рисунке 3 показаны доля микроуглублений, образованных на поверхности коллектора шлифовальной лентой зернистостью Р32 при числе проходов, равным 3, границы доверительного интервала и доля микроуглублений, вычисленная по представленным в главе 2 математическим зависимостям.

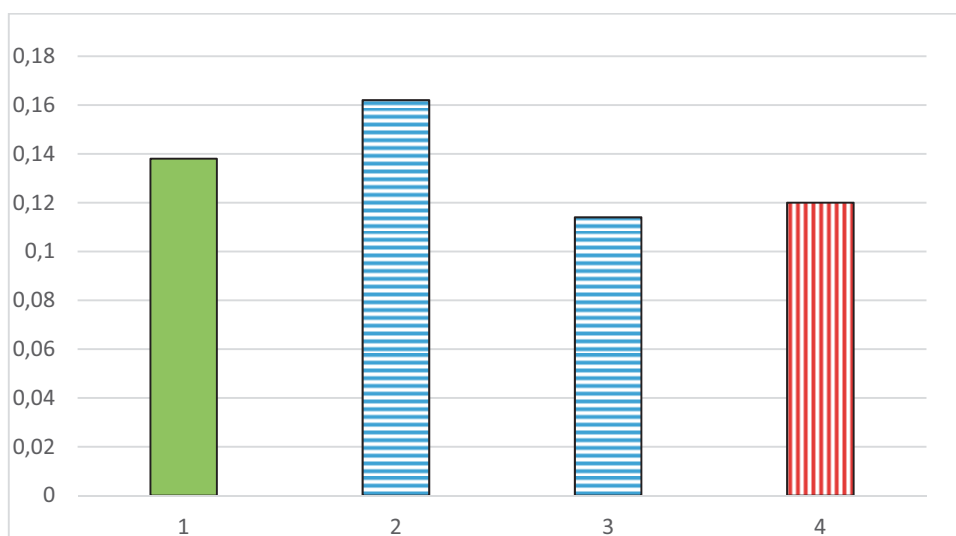


Рис. 3. Доля микроуглублений на поверхности коллектора при их формировании шлифовальной лентой зернистостью Р32 при числе проходов 3:

1 – среднее замеренное значение, 2 и 3 – границы доверительного интервала, 4 – вычисленное по математической модели

Как видно из рис. 3, доля микроуглублений, созданная более крупнозернистой шлифовальной лентой более чем в 3 раза выше, чем созданная при тех же 3 проходах более мелкозернистой шлифовальной лентой. Объясняется это тем, что более крупнозернистый инструмент, хотя и имеет на рабочей поверхности меньшее число абразивных, но оставляет микроуглубления большей площади, которая в квадратичной зависимости находится от глубины микроуглублений. Последний фактор является преобладающим, поэтому при использовании крупнозернистой шлифовальной ленты доля площади микроуглублений на поверхности коллектора возрастает. Это согласуется с результатами математического моделирования, так как, как видно из рис. 3, вычисленное по математиче-

ской модели значение доли площади, занимаемой микроуглублениями, находится между верхней и нижней границами доверительного интервала. Поэтому вычисленное значение принимаем адекватным опытным данным.

На рисунке 4 показана доля микроуглублений, образованных на поверхности коллектора шлифовальной лентой зернистостью Р32 при числе проходов, равным 6, границы доверительного интервала и доля микроуглублений, вычисленная по математическим зависимостям.

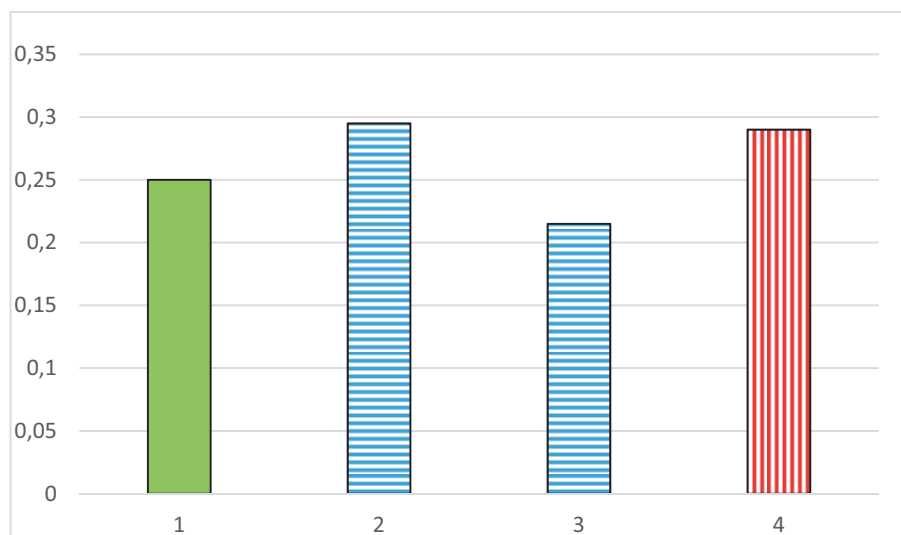


Рис. 4. Доля микроуглублений на поверхности коллектора при их формировании шлифовальной лентой зернистостью Р32 при числе проходов 6:
1 – среднее замеренное значение, 2 и 3 – границы доверительного интервала,
4 – вычисленное по математической модели

Как видно из рис. 4, доля микроуглублений, образованных при 6 проходах шлифовальной ленты возросла в 1,5 раза по сравнению с долей площади микроуглублений, образованных при 3 проходах. Объясняется это частичным перекрытием микроуглублений, образованных при повторных проходах, как если бы перекрытие не наблюдалось, то доля площади микроуглублений при 6 проходах должна была бы возрасти до 0,36, т. е. в более чем в 2 раза. Поэтому с увеличением числа проходов степень перекрытия микроуглублений возрастает, что согласуется с результатами математического моделирования. Из рис. 4 видно, что вычисленное по математической модели значение доли площади, занимаемой микроуглублениями, находится между верхней и нижней границами доверительного интервала, поэтому вычисленное значение принимаем адекватным опытным данным.

Таким образом, выполненные исследования показали, что доля микроуглублений, определяемая по математическим зависимостям, находится внутри доверительного интервала экспериментальных значений, поэтому математическую модель формирования микроуглублений на поверхности коллектора следует считать адекватной опытным данным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования показали, что доля площади, занимаемая на поверхности коллектора микроуглублениями, возрастает с увеличением зернистости шлифовальной ленты. Объясняется это тем, что более крупные зерна оставляют более глубокие микроуглубления, а так как их площадь зависит от глубины в квадратичной степени, то это и приводит к увеличению доли площади микроуглублений на поверхности коллектора с увеличением зернистости инструмента. При повторных проходах часть углублений перекрывается между собой, и поэтому с увеличением числа проходов инструмента доля площади микроуглублений и возрастает, но не в прямой зависимости от числа проходов. Численные сравнения значений доли микроуглублений на поверхности коллектора, определяемыми по математической зависимости, находится внутри доверительного интервала экспериментальных значений. Поэтому математические зависимости следует признать адекватными опытным данным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Королев, А.В. Повышение износостойкости коллекторной пары созданием микроуглублений на поверхности коллектора / А.В. Королев, В.В. Жалнин, А.А. Королев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 9. – С. 545-546.

2. RU 104368. Установка для формирования углеродного слоя на коллекторе электрической машины. 10.05.2011 бюл. № 13
3. *Петроченко, С.В.* Технология повышения качества рабочей поверхности коллекторов электрических машин постоянного тока при ее механической обработке. Автореф. дисс. ... канд. техн. наук / С.В. Петроченко. – Омск, 2011. – 32 с.
4. *Петроченко, С.В.* Поверхностное упрочнение рабочей поверхности коллекторов электрических машин постоянного тока методом ударно-акустической обработки коллекторов / С. В. Петроченко, А. А. Федоров // Известия Транссиба. – 2011. – № 3 (7). – С. 29 - 33. 10.
5. *Рауба, А.А.* Повышение износостойкости рабочей поверхности коллекторов тяговых электродвигателей методом ударно-акустической обработки / А.А. Рауба, С.В. Петроченко // Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава: Материалы всеросс. науч.-техн. конф. с междунар. участием. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2011. – С. 282-286.
6. 2501134 Способ создания оксидной пленки на рабочей поверхности коллекторов машин постоянного тока. 10.12.2013. Бюл. № 34.
7. Патент на полезную модель RU 20108 U1, 02.02.2021 Устройство для формирования микрорельефа поверхности трения / Королев А.В., Павлов В.И., Скрипкин А.А.
8. Патент на полезную модель RU 207027 U1, 07.10.2021. Устройство для формирования микрорельефа поверхности трения.
9. Патент на полезную модель RU 220184 U1, 30.08.2023. Устройство для формирования микрорельефа поверхности трения / Королев А.В., Фетисов А.Ю., Комлик О.С., Скрипкин А.А., Жалнин В.В.
10. *Королев, А.А.* Определение числовых параметров процесса формирования дискретного микрорельефа на поверхностях коллектора / А.А. Королев, А.В. Королев, В.В. Жалнин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 7. – С. 415-420. – DOI 10.24412/2071-6168-2023-7-415-416. – EDN XNNRSC.
11. *Королев, А.В.* Определение площади поверхности смазочных канавок при процессе формирования частично регулярного микрорельефа на цилиндрических поверхностях / А. В. Королев, А.А. Королев, В.В. Жалнин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 2. – С. 460-464. – DOI 10.24412/2071-6168-2024-2-460-461. – EDN PQCUJR.

PARAMETERS OF DISCRETE MICRORELIEF DURING ITS ROLLING WITH AN ABRASIVE BELT

© 2025 V.V. Zhalnin

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia

The study demonstrates the dependence of the surface fraction of micropits, formed by abrasive grains on the surface of an electric motor commutator during rolling with an abrasive belt, on the grit size of the abrasive belt and the number of passes. It was found that an increase in the grit size of the abrasive belt and the number of passes leads to a higher surface fraction of micropits on the commutator. The research results are compared with calculated values previously obtained through mathematical modeling of the micropit formation process using an abrasive belt.

Keywords: micropits, commutator, mathematical model, micropit surface fraction, confidence intervals.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-3-200-205

EDN: SFWQMU

REFERENCES

1. *Korolev, A.V.* Povyshenie iznosostojkosti kollektornoj pary sozdaniem mikrouglublenij na poverhnosti kollektora / A.V. Korolev, V.V. Zhalnin, A.A. Korolev // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. – 2024. – № 9. – С. 545-546.
2. RU 104368. Ustanovka dlya formirovaniya uglerodnogo sloya na kollektore elektricheskoy mashiny. 10.05.2011 byul. № 13
3. *Petrochenko, S.V.* Tekhnologiya povysheniya kachestva rabochej poverhnosti kollektorov elektricheskix mashin postoyannogo toka pri ee mekhanicheskoy obrabotke. Avto-ref. diss. ... kand. tekhn. nauk / S.V. Petrochenko. – Омск, 2011. – 32 s.
4. *Petrochenko, S.V.* Poverhnostnoe uprochnenie rabochej poverhnosti kollektorov elektricheskix mashin postoyannogo toka metodom udarno-akusticheskoy obrabotki kollektorov / S. V. Petrochenko, A. A. Fedorov // Izvestiya Transsiba. – 2011. – № 3 (7). – С. 29 - 33. 10.
5. *Rauba, A.A.* Pov'ppenie iznosostojkosti rabochej poverhnosti kollektorov tyagovyh elektrodvetatelej metodom udarno-akusticheskoy obrabotki / A.A. Rauba, S.V. Petrochenko // Tekhnologicheskoe obespechenie remonta i povyshenie dinamicheskix kachestv zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostav: Materialy vsereoss. nauch.-tekhn. konf. s mezhdunar. uchastiem. – Омск : Омский гос. ун-т путе сообщени, 2011. – С. 282-286.
6. 2501134 Sposob sozdaniya oksidnoj plenki na rabochej poverhnosti kollektorov mashin postoyannogo toka.

- 10.12.2013. Byul. № 34.
7. Patent na poleznuyu model' RU 20108 U1, 02.02.2021 Ustrojstvo dlya formirovaniya mikrorel'efa poverhnosti treniya / Korolev A.V., Pavlov V.I., Skripkin A.A.
 8. Patent na poleznuyu model' RU 207027 U1, 07.10.2021. Ustrojstvo dlya formirovaniya mikrorel'efa poverhnosti treniya.
 9. Patent na poleznuyu model' RU 220184 U1, 30.08.2023. Ustrojstvo dlya formirovaniya mikrorel'efa poverhnosti treniya / Korolev A.V., Fetisov A.Yu., Komlik O.S., Skripkin A.A., Zhalnin V.V.
 10. Korolev, A.A. Opredelenie chislovyh parametrov processa formirovaniya diskretnogo mikrorel'efa na poverhnostyah kollektora / A.A. Korolev, A.V. Korolev, V.V. Zhalnin // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. – 2023. – № 7. – S. 415-420. – DOI 10.24412/2071-6168-2023-7-415-416. – EDN XNNRSC.
 11. Korolev, A.V. Opredelenie ploshchadi poverhnosti smazochnykh kanavok pri processе formirovaniya chastichno regul'yarnogo mikrorel'efa na cilindricheskikh poverhnostyakh / A. V. Korolev, A.A. Korolev, V.V. Zhalnin // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. – 2024. – № 2. – S. 460-464. – DOI 10.24412/2071-6168-2024-2-460-461. – EDN PQCUJR.