

О НЕКОТОРЫХ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ СООТНОШЕНИЯХ, СВЯЗАННЫХ С ИНТЕНСИВНОСТЬЮ ИЗНАШИВАНИЯ

В.В. ИЗМАЙЛОВ, д-р техн. наук

Тверской государственной технической университет
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: iz2v2@mail.ru

© Измайлов В.В., 2024

Рассмотрены корреляционные соотношения, описывающие зависимость линейной интенсивности изнашивания фрикционного контакта от коэффициента трения и твердости материалов компонентов пары трения. Соотношения получены статистической обработкой экспериментальных данных, относящихся к паре трения «щетка – коллектор». Установлена сильная корреляционная связь линейной интенсивности изнашивания компонентов пары трения с коэффициентом трения, а также обнаружена сильная положительная корреляция линейной интенсивности изнашивания с твердостью материалов щетки и коллектора, что противоречит известным результатам, свидетельствующим о возрастании износостойкости с увеличением твердости трущихся деталей. Приводится наиболее вероятное объяснение такого противоречия. Кроме того, указанная зависимость носит немонотонный характер с заметным возрастанием скорости изнашивания, если твердость материала щетки становится сравнимой с твердостью материала коллектора.

Ключевые слова: трение, коэффициент трения, линейная интенсивность изнашивания, твердость, корреляционные связи.

DOI: 10.46573/2658-5030-2024-2-36-43

ВВЕДЕНИЕ

Процесс изнашивания при трении относится к случайным нестационарным процессам. Его случайный характер обусловлен влиянием на него многочисленных факторов, многие из которых сами по себе являются случайными величинами. Эти факторы можно условно разделить на внешние и внутренние. К числу первых относятся нагрузка на фрикционный контакт, скорость скольжения, параметры внешней среды, наличие или отсутствие смазочного материала и др. [1]. Основными внутренними факторами являются физико-механические свойства материалов контактирующих деталей, характеристики смазочного материала (при его наличии) и шероховатость поверхностей трения. В скользящих электрических контактах наряду с механическим изнашиванием происходит электроэрозионное изнашивание. К факторам, влияющим на этот вид изнашивания, относят плотность тока и коммутируемое напряжение [2].

Учесть комплексное влияние многочисленных факторов на интенсивность механического изнашивания I_h Ю.Н. Дроздов [3] предложил с помощью критериальных зависимостей

$$I_h = I_h(\Phi_a, \Phi_{см}, \Phi_y, \Phi_{ш}), \quad (1)$$

где Φ – безразмерные комплексы величин (критерии), которые влияют на характеристики изнашивания: Φ_a – критерий нагруженности контакта; $\Phi_{см}$ – критерий смазочной способности; Φ_y – критерий усталостной прочности; $\Phi_{ш}$ – критерий шероховатости. Одним из основных является критерий нагруженности контакта:

$$\Phi_a = \frac{p_n}{H}, \text{ или } \Phi_a = \frac{fp_n}{H}.$$

Таким образом, можно ожидать зависимость интенсивности изнашивания от номинального контактного давления $p_n = N / A_n$ (или от нормальной нагрузки N , так как в большинстве случаев номинальная площадь контакта $A_n = \text{const}$), коэффициента трения f и твердости (микротвердости) H материалов трущихся тел. Целью данной работы являлось установление степени влияния перечисленных факторов на интенсивность изнашивания деталей скользящего контакта «щетка – коллектор» и определение характера этого влияния.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Если ограничиться рассмотрением влияния на интенсивность изнашивания только первого, основного критерия – нагруженности контакта, включив остальные в коэффициент износа K , то уравнение (1) можно записать в виде

$$I_h = K \left(\frac{p_n}{H} \right)^m \quad (2)$$

или в виде

$$I_h = K \left(\frac{fp_n}{H} \right)^m. \quad (3)$$

При $m = 1$ уравнение (2) превращается по существу в известное уравнение Хольма – Арчарда [4] для количественной характеристики величины износа при трении.

При выборе методики экспериментов и дальнейшем анализе их результатов необходимо учитывать специфику исследуемых пар трения. В качестве объекта исследования в данном случае были выбраны пары трения, имитирующие скользящий электрический контакт «щетка – коллектор». Специфика таких пар трения заключается, во-первых, в ограниченном выборе материалов трущихся деталей – щетки и коллектора. Поскольку для снижения потерь энергии в электрическом контакте желательно минимальное контактное электросопротивление, материалы контактных деталей должны иметь хорошую электрическую проводимость. Первым претендентом на роль контактного материала по критерию проводимости выступает серебро, а из недорогих металлов – медь. Однако фрикционные характеристики меди отнюдь не высоки. Для их улучшения используют композиции на основе меди с добавлением антифрикционных компонентов – твердосмазочных материалов. Это может быть графит, дисульфид молибдена и другие аналогичные по строению кристаллические материалы, а также легкоплавкие металлы.

Во-вторых, специфика электроконтактных пар трения «щетка – коллектор» состоит в том, что за редким исключением они работают в режиме трения без смазочного материала (сухое трение).

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты проводились на установке для исследования фрикционных и электрических характеристик материалов щеточно-коллекторного узла [5]. Коллектор изготовлен из меди, щетки – из композиционных материалов на основе меди с добавлением антифрикционных компонентов, как указано выше.

Базовый уровень режимов испытаний следующий:

номинальное контактное давление $p_n = 70$ кПа;

линейная скорость скольжения в контакте $V = 5$ м/с;

плотность тока $j = 0,1$ А/мм².

Трение происходило в отсутствие смазочного материала. Перед началом испытаний контакт прирабатывался в течение 10 часов.

Микротвердость материалов измерялась в соответствии с ГОСТ 9450-76 на приборе ПМТ-3. Линейный износ щеток $h_{щ}$ определялся под микроскопом по изменению размера щетки в направлении, перпендикулярном поверхности трения, линейный износ коллектора h_k – по профилограмме поверхности трения вдоль образующей цилиндрического коллектора. Путь трения L вычислялся по известной скорости скольжения и длительности испытаний. Характеристиками величины износа служили линейные интенсивности изнашивания щетки $I_{щ} = h_{щ} / L$ и коллектора $I_k = h_k / L$.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Прежде всего, представляет интерес оценить наличие корреляционной связи интенсивности изнашивания щетки и коллектора. Как видно из рис. 1, линейные интенсивности изнашивания щетки и коллектора явно коррелированы. Степень корреляции оценивали с помощью непараметрических методов статистики по величине коэффициентов ранговой корреляции Спирмена ρ и Кендалла τ [6], которые не требуют исключительно линейной связи между исследуемыми переменными и нормального распределения их числовых значений. Полученные значения $\rho = 0,85$ и $\tau = 0,72$ статистически значимы на уровне $p < 0,01$. Такие коэффициенты соответствуют высокой степени корреляции случайных величин, в данном случае интенсивностей изнашивания щетки и коллектора.

Абсолютные значения линейной интенсивности изнашивания щетки существенно меньше соответствующих величин для коллектора, что вполне ожидаемо из-за гораздо меньшей площади поверхности трения щетки по сравнению с коллектором.

Связь линейной интенсивности изнашивания щетки и коллектора с величиной коэффициента трения представлена на рис. 2. Наблюдаемая зависимость $I_h(f)$ – существенно нелинейная, с ростом коэффициента трения интенсивность изнашивания возрастает по степенному закону. Проверка тесноты взаимосвязи интенсивности изнашивания и коэффициента трения показала очень высокую степень корреляции этих параметров для коллектора и чуть менее высокую – для щетки. Коэффициент ранговой корреляции Спирмена $\rho = 0,90$ для переменных I_k и f ; $\rho = 0,80$ для переменных $I_{щ}$ и f . Коэффициент корреляции Кендалла, как обычно, несколько меньше: $\tau = 0,78$ для переменных I_k и f и $\tau = 0,64$ для переменных $I_{щ}$ и f .

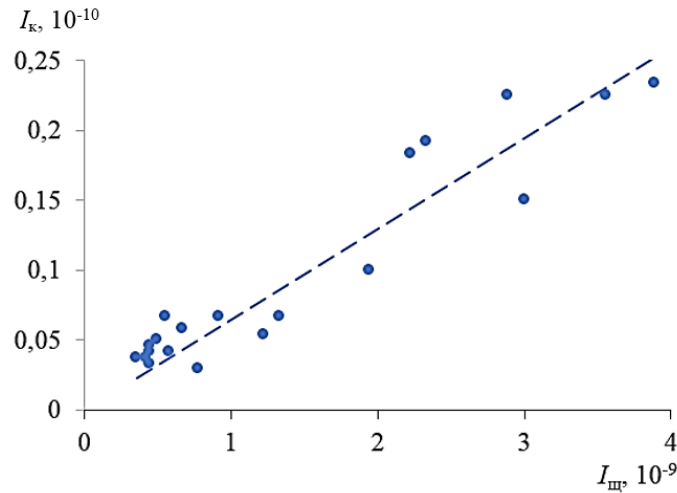


Рис. 1. Корреляция линейных интенсивностей изнашивания щетки и коллектора:
 точки – экспериментальные значения;
 пунктир – аппроксимирующая зависимость

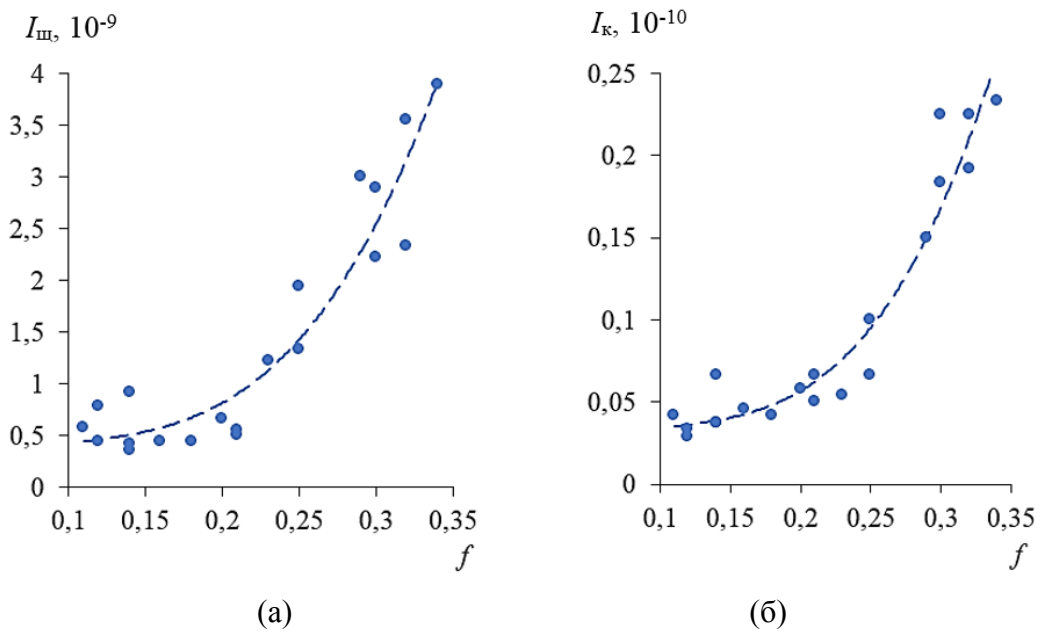


Рис. 2. Зависимость интенсивности изнашивания щетки (а) и коллектора (б) от коэффициента трения: точки – экспериментальные результаты;
 пунктир – аппроксимирующая зависимость

Уравнения (2) и (3) свидетельствуют о том, что интенсивность механического изнашивания зависит, помимо коэффициента трения, от твердости изнашиваемого материала. В трибологии хорошо известны исследования М.М. Хрущева, подтверждающие линейную зависимость относительной износостойкости металлов от их твердости [7]. В уравнении Арчарда твердость выступает как верхняя оценка величины фактического контактного давления. Кроме того, существуют хорошо проверенные теоретические и эмпирические зависимости, однозначно связывающие твердость с прочностными характеристиками материала.

Экспериментальные результаты, представленные на рис. 3, на первый взгляд противоречат закономерностям (2) и (3): интенсивность изнашивания как щетки, так и коллектора возрастает при увеличении микротвердости материала щетки.

Зависимость интенсивности изнашивания щетки от твердости материала, из которого она изготовлена, может быть выражена линейным уравнением регрессии (пунктир на рис. 3а), которое статистически значимо на уровне $p < 0,01$. Что касается зависимости интенсивности изнашивания коллектора от твердости материала щетки, то на графике $I_k(H_{щ})$ наблюдается излом, приходящийся примерно на величину твердости, равную твердости меди, из которой изготовлена щетка, а именно 770 МПа. Если материал щетки тверже материала коллектора, коллектор изнашивается гораздо интенсивнее, чем в паре трения более твердого коллектора с менее твердой щеткой.

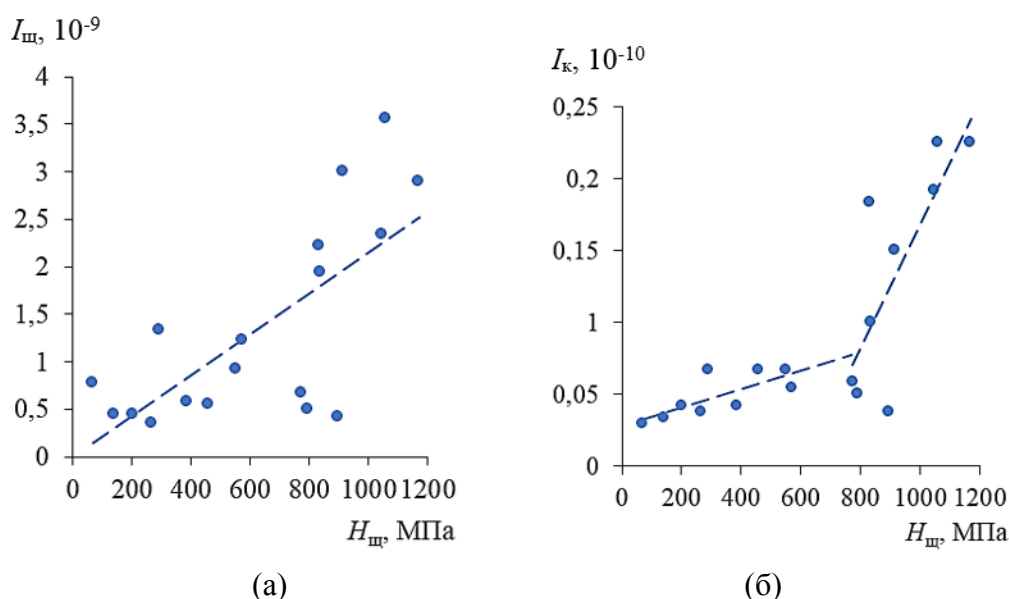


Рис. 3. Зависимость интенсивности изнашивания щетки (а) и коллектора (б) от твердости материала щетки: точки – экспериментальные результаты, пунктир – аппроксимирующая зависимость

Коэффициенты ранговой корреляции микротвердости материала щетки и интенсивностей изнашивания щетки и коллектора говорят как минимум о заметной корреляционной связи этих параметров. Для переменных $I_{щ}$, $H_{щ}$ коэффициент ранговой корреляции Спирмена $\rho = 0,65$, Кендалла $\tau = 0,48$. Для переменных I_k , $H_{щ}$ коэффициент ранговой корреляции Спирмена $\rho = 0,78$, Кендалла $\tau = 0,64$. Все коэффициенты статистически значимы на уровне $p < 0,01$.

Объяснение того, что интенсивность изнашивания трущихся тел в данной паре возрастает с увеличением твердости, заключается в следующем. На наш взгляд, мы имеем дело с так называемой косвенной корреляцией двух случайных величин, которые не имеют непосредственной причинно-следственной связи, а определяются общей для них причиной [8]. В данном случае высокую твердость, иногда выше твердости материала коллектора, имеют щетки, изготовленные из материалов с малым содержанием антифрикционных компонентов и высоким содержанием меди

(рис. 4а). В контакте таких материалов с медным коллектором условия трения приближаются к трению одноименных материалов, что крайне нежелательно с трибологической точки зрения. Коэффициент трения в таких парах высокий (рис. 4б), следовательно, высока и интенсивность изнашивания (рис. 5). Таким образом, зависимости, представленные на рис. 3, являются следствием зависимостей, показанных на рис. 2.

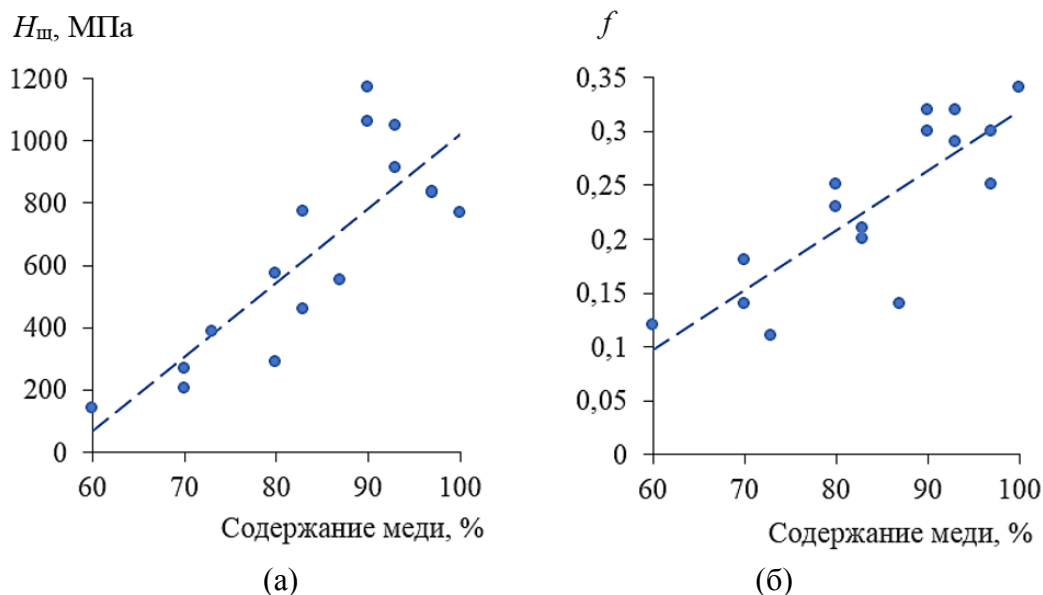


Рис. 4. Зависимость твердости (а) и коэффициента трения (б) от содержания меди в материале щетки: точки – экспериментальные результаты; пунктир – аппроксимирующая зависимость

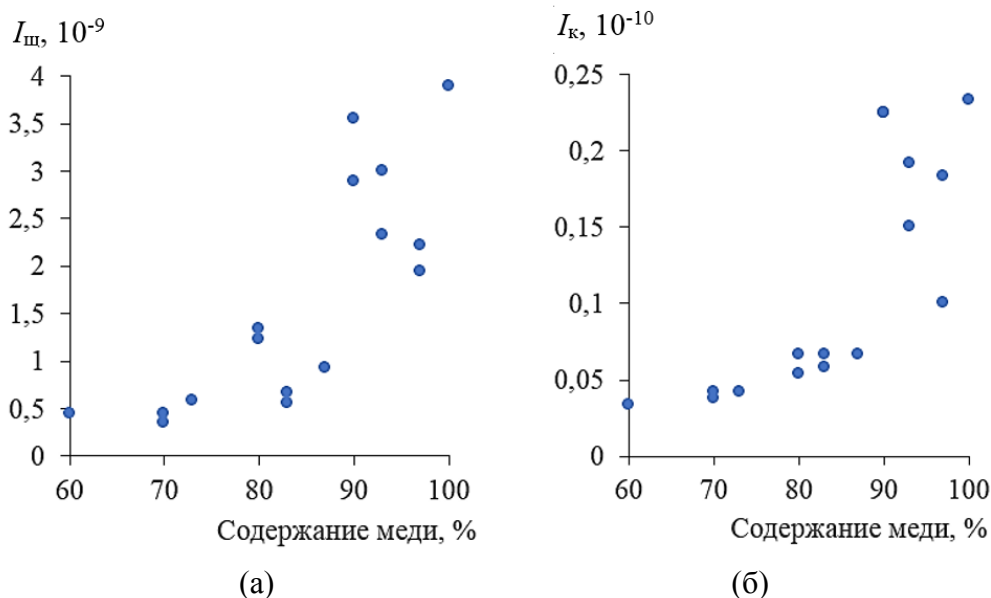


Рис. 5. Зависимость интенсивности изнашивания щетки (а) и коллектора (б) от содержания меди в материале щетки

Непараметрические критерии подтверждают высокую силу корреляционной связи интенсивностей изнашивания щетки и коллектора с процентным содержанием меди в материале щетки. Коэффициент ранговой корреляции Спирмена для переменных $I_{щ}$ (% содержания Cu) $\rho = 0,85$, коэффициент корреляции Кендалла $\tau = 0,64$. Соответственно для переменных I_k (% содержания Cu) $\rho = 0,89$ и $\tau = 0,75$. Все критерии значимы на уровне $p < 0,01$.

Корреляция шероховатости поверхностей трения и интенсивности изнашивания не исследовалась, поскольку в приработанном контакте после завершения приработки формируется так называемая равновесная шероховатость, практически не зависящая от исходной и сохраняющаяся в процессе трения [1]. Равновесную шероховатость нельзя считать независимым параметром, влияющим на интенсивность изнашивания, так как она сама является функцией определяющих параметров трения в исследуемом контакте.

Влияние электрических параметров на интенсивность изнашивания выходит за рамки данной работы и составляет предмет самостоятельного исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Статистический анализ экспериментальных результатов исследования износостойкости компонентов пары трения, имитирующей скользящий электрический контакт «щетка – коллектор», выявил высокую степень корреляции линейной интенсивности изнашивания и коэффициента трения. Таким образом, коэффициент трения можно рассматривать как объективный комплексный параметр фрикционных свойств компонентов фрикционной пары и условий трения, характеризующий, в том числе, износостойкость. При исследовании степени влияния других факторов на износостойкость компонентов фрикционного контакта надо учитывать возможность косвенной корреляции анализируемых случайных величин, что показано в данной работе на примере зависимости интенсивности изнашивания щетки и коллектора от твердости материала щетки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Основы трибологии (трение, износ, смазка): учебник для технических вузов / Чичинадзе А.В. [и др.]. М.: Машиностроение, 2001. 664 с.
2. Мышкин Н.К., Кончиц В.В., Браунович М. Электрические контакты. Долгопрудный: Интеллект, 2008. 506 с.
3. Когаев В.П., Дроздов Ю.Н. Прочность и износостойкость деталей машин: учебное пособие для машиностроительных специальностей вузов. М.: Высшая школа, 1991. 319 с.
4. Мышкин Н.К., Петроковец М.И. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 368 с.
5. Измайлов В.В., Гусев А.Ф., Новоселова М.В. Комплекс аппаратуры для испытаний электрофрикционных контактных соединений. Часть 1. *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: Межвузовский сборник научных трудов*. Тверь: ТвГТУ, 2022. Вып. 15. С. 29–37.
6. Кремер Н.Ш. Теория вероятностей и математическая статистика: учебник для студентов вузов, обучающихся по экономическим специальностям. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2010. 551 с.

7. Хрущев М.М. Трение, износ и микротвердость материалов: избранные работы (к 120-летию со дня рождения). М.: КРАСАНД, 2012. 512 с.

8. Ферстер Э., Ренц Б. Методы корреляционного и регрессионного анализа. Руководство для экономистов. М.: Финансы и статистика, 1983. 304 с.

Для цитирования: Измайлов В.В. О некоторых корреляционных соотношениях, связанных с интенсивностью изнашивания // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2024. № 2 (22). С. 36–43.

ON SOME CORRELATIONS, RELATED TO WEAR RATE

V.V. IZMAILOV, Dr. Sc.

Tver State Technical University
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: iz2v2@mail.ru

Correlation relationships are considered that describe the dependence of the linear wear rate of a friction contact on the friction coefficient and the hardness of the materials of the components of the friction pair. The relationships were obtained by statistical processing of experimental data relating to the brush-commutator friction pair. A strong correlation has been established between the linear wear rate of the friction pair components and the friction coefficient. A strong positive correlation of the linear wear rate with the hardness of the brush and commutator materials was also discovered, which contradicts the known results indicating an increase in wear resistance with increasing hardness of the rubbing parts. The most probable explanation for this contradiction is given. In addition, this dependence is non-monotonic with a noticeable increase in wear rate if the hardness of the brush material becomes comparable to the hardness of the commutator material.

Keywords: friction, friction coefficient, linear wear rate, hardness, correlations.

Поступила в редакцию/received: 15.02.2024; после рецензирования/ revised: 22.02.2024;
принята/accepted: 27.02.2024