

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 621.91:621.793:669.018.45

Об электрических явлениях при трении

А. А. Рыжкин, В. Э. Бурлакова

(Донской государственный технический университет)

Обобщены литературные данные и полученные авторами результаты комплексного изучения электрических процессов, протекающих в зоне фрикционного контакта.

Ключевые слова: трение, износ, контактная электризация, электрохимические и электрокинетические явления, трибоэлектрические явления.

Введение. Функционирование системы трения и её выход на оптимальный режим изнашивания определяется комплексом внешних и внутренних факторов, роль которых до настоящего времени до конца ещё не выяснена.

К внешним факторам, как известно, относятся нагрузка, скорость относительного перемещения трущихся тел, внешняя среда, физико-механические свойства материалов. К внутренним следует отнести, по нашему мнению, процессы электрической природы. Это электрические процессы, сопутствующие трению и износу металлов и их сплавов, полимеров и композиционных материалов на их основе, и являющиеся своеобразными каналами диссипации энергии трения [1, 2]: контактная электризация; электрохимические и электрокинетические явления: экзоелектронная эмиссия; электроакустический эффект; возникновение электродвижущей силы (ЭДС) самоиндукции; электромагнитные явления; эмиссия электронов высоких энергий; возникновение плазмы; термоэлектрические явления.

Электрические явления при трении. Контактная электризация обусловлена контактной разностью потенциалов при соприкосновении двух тел с разной работой выхода электронов ($W_{AB} = \Phi_A - \Phi_B$) и проявляется в условиях трения даже металлических тел, так как в зазоре между трущимися телами из-за наличия между впадинами микровыступов шероховатых поверхностей, плёнок твёрдой или жидкой смазки с диэлектрическими свойствами образуется своеобразный конденсатор [3, 4]. Адсорбция на поверхности отрицательных ионов, увеличивающая работу выхода электрона, может стать причиной возникновения не только эффекта конденсатора, но и больших потенциалов и значительных термоэлектронных токов. Самостоятельное значение контактная электризация имеет при трении металлополимерных пар [5—11]. В работах [11, 12] установлено, что в парах трения «металл — полимер» в зависимости от сорта полимера, свойств среды возникают потенциалы от десятков до нескольких тысяч вольт.

Величина переменного сигнала в этих парах колеблется от десятков до сотен милливольт [8]. Оказалось, что величина и знак заряда полимера (электрического поля, потенциала) влияют на интенсивность изнашивания. В [10], например, установлено, что при подаче на пластмассу (материал тормозных колодок) положительного потенциала от внешнего источника износ контртела в 2—3 раза выше, чем при отрицательной полярности (рис. 1). Для обратных пар трения (вал изготовлен из пластмассы, а тормозная колодка — из стали [8]) при замкнутой цепи по ней протекает ток величиной $(1—2) \cdot 10^{-6}$ А с направлением от подшипника к валу; размыкание электрической цепи снижает износ подшипника (рис. 2). Для электропроводной пластмассы ФК-24С ток от внешнего источника может увеличивать и снижать трение [12].

Электрохимические процессы [13] проявляются при контакте металла с жидкостью, куда переходят ионы металла, при этом металлическая поверхность приобретает потенциал, устанавливающий равновесие между процессом выделения и осаждения ионов. Если в растворе находится контакт из двух металлов, то по этой цепи будет течь электрический ток до тех пор, пока в растворе сохраняются ионы металла и раствора.

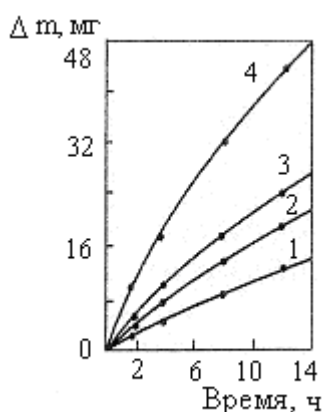


Рис. 1. Зависимость весового износа стали (кривые 1 и 3) и материала 8-1-66 (кривые 2 и 4) от времени при подаче на пластмассу потенциала +30 В (кривые 3 и 4) и -30 В (кривые 1 и 2) [10]

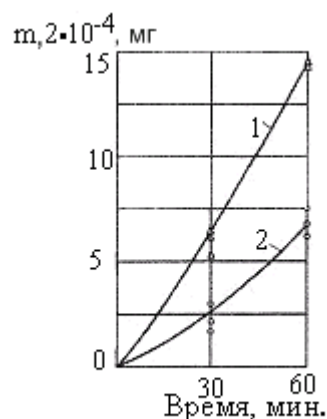


Рис. 2. Износ стального подшипника в паре «ДПК (с графитом) — сталь»: 1 — пара трения замкнута (оба элемента заземлены); 2 — пара трения разомкнута изоляцией [14]

Электрические токи этой природы могут протекать между разными участками неомогенной поверхности [15]. Кроме этого возможна электризация поверхности металла и жидкости до десятков вольт, например масла как смазки, при её движении [16]. В [3] описан скачок потенциала на металле при наличии смазки, который объясняется действием гальванических пар и электрокинетическими явлениями.

С электрохимических позиций объяснимы коррозионно-механический износ [17] и феномен избирательного переноса (ИП) [18—22].

При трении пары «бронза — сталь» в среде глицерина в результате электрохимического действия поверхность медного сплава подвергается избирательному растворению. Это происходит вследствие того, что все элементы сплава обладают значительно большей химической активностью по сравнению с медью и являются анодами, о чём свидетельствует величина стандартных электродных потенциалов компонентов, например сплава Бр. ОЦС-5-5-5. Избирательное анодное растворение компонентов и удаление их со смазкой из зоны трения приводят к образованию тончайшего медного покрытия на поверхности бронзы. Затем ионы меди оседают на катодных участках стали, образуя медную плёнку. Доказательством электрохимической природы избирательного переноса является установленная связь между износостойкостью металлов и величиной гальваноЭДС, а также проявление ИП в коррозионно-активных средах [17].

Явление *водородного износа* в большинстве случаев также имеет электрохимическую природу и определяется электродным потенциалом металла. В [23] рассмотрены с электрохимических позиций возможные превращения на фрикционном контакте, которые приводят к образованию свободного водорода. Трение, с одной стороны, ускоряет десорбцию водорода с поверхности, а с другой — усиливает способность металла поглощать водород. Обычно при трении потенциал смещается в катодную область, что способствует более интенсивному выделению водорода.

Экзоэлектронная эмиссия (эффект Крамера) — процесс излучения электронов с поверхности твёрдых тел в результате возбуждения поверхности деформациями при различных видах об-

работки, а также в результате облучения источниками различной физической природы (γ -кванты, ультразвуковое излучение и др.) [24].

Данные исследований интенсивных экзоэмиссий при сухом трении показывают, что по кривым эмиссии, снятым в динамике трения, можно получить информацию о процессах в зоне контакта, оценить состояние поверхностей трения в связи с развитыми дефектами их структуры, уровень свободной поверхностной энергии и изучить закономерности реверсивного трения. В [24] установлено, что в начальный момент трения увеличивается интенсивность экзоэмиссии, твёрдость и снижается работа выхода электрона, причём в период приработки наблюдается прямая зависимость между экзоэмиссией и твёрдостью. При реверсе эта закономерность нарушается. Уменьшение при реверсе работы выхода электронов соответствует возрастанию экзоэмиссии (центрами её являются места скоплений дефектов структуры).

Рассмотрим более подробно термоэлектрические явления в условиях контактного взаимодействия при трении, которые можно в этой связи называть трибоэлектрическими.

Изучение возникновения скачков силы трения при протягивании штифтов через цилиндрические кольца [25] показало, что причиной скачков служат электростатические явления в слое смазки и контактных поверхностях металлических элементов пары трения. Диэлектрические свойства смазочной плёнки определяют величину пробойного напряжения (15—20 кВ) и тока, проходящего через контакт. В среде парафина, например для стальной пары при прохождении тока 2 А, скачок силы трения уменьшается почти в 2 раза по сравнению с бестоковым режимом. Авторы считают, что в общую силу трения вносит существенный вклад электростатическая составляющая, и, чтобы обеспечить плавное, без скачков, скольжение, требуется ток большей плотности.

В результате анализа причин возникновения электрического тока при трении [26, 27], установлено, что электрический ток возникает даже при трении образцов из одного материала. Это обстоятельство позволило автору сделать вывод, что при трении твёрдых тел электрический ток протекает за счёт термоЭДС и термоэлектронной эмиссии. Зафиксированные средние значения тока при трении пластин из различных металлов со смазкой и без смазки, показали, что величина и направление тока различны для разных металлов.

Термоэлектронные токи, как показано в работе [27], являются решающим фактором, влияющим на величину износа сопряжённых пар. Для проверки влияния электрического тока на износ трущихся образцов были проведены долговременные испытания [27] образцов при работе в нормальных условиях и с наложенным закорачивающим шунтом. При одинаковых условиях работы износостойкость трущихся пар с закорачивающим шунтом (частичная компенсация термоЭДС) в 2 раза выше износостойкости образцов без шунта (рис. 3).

Аналогичные результаты получены в [27] при введении в зону трения постоянного тока от внешнего источника. Установлено, что при токе 80—120 мкА колебание потенциалов минимальное и изображается на осциллограммах относительно ровной линией. Для каждой трущейся пары существует оптимальное значение силы тока. В производственных условиях изучение влияния тока на износ фильеров при протягивании проволоки показало, что стойкость фильеров с подключённым конденсатором в 3 раза выше стойкости их при работе в обычных условиях.

Влияние электрического тока на износ при трении исследуется в [28], где рассматривается износ образцов из оловянистой бронзы при полусухом трении о торец стального закалённого диска. Испытанию подвергались одновременно два образца, изолированные друг от друга и корпуса установки, а износ определялся на одном из образцов. Опыты проводились при $V = 12,5$ м/с и удельном давлении $p = 1,6$ кгс/см² со смазкой трущихся поверхностей техническим вазелином. Устанавливалось влияние тока от постороннего источника ($I = 6$ А, $E = 1$ В) и его направление на износ образца, а также термотока, возникающего при изоляции исследуемого образца на пло-

щадке трения. Термоток в этом случае был меньше, чем при соединении двух образцов, и возникал, как указывает автор, вследствие разности скоростей трения на разных участках площадки трения.

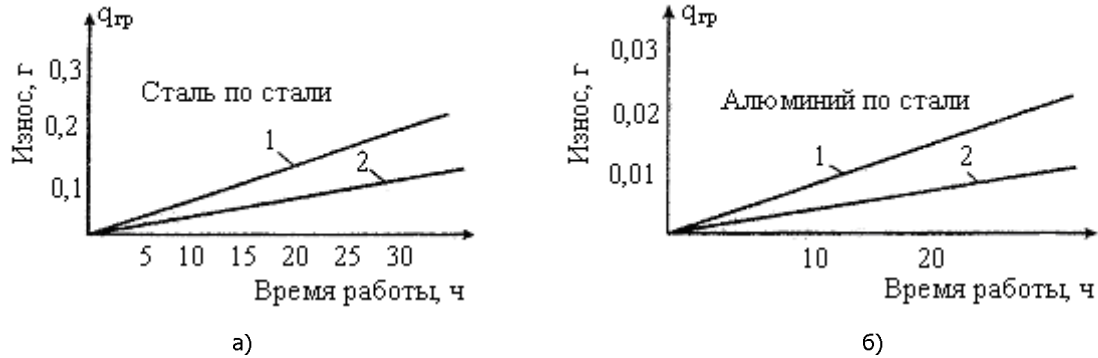


Рис. 3. Износ трущихся поверхностей стальных и алюминиевых образцов:
а — при работе без шунта; б — при наложении шунта [26, 27]

Из рис. 4 видно, что наибольший износ наблюдается в случае протекания тока от истираемого образца к диску (рис. 4, а). При обратной полярности (рис. 4, б) износ образца уменьшается в 4 раза. Наименьший износ установлен, когда истираемый образец не является частью электрической цепи (рис. 4, в) и приблизительно в 1,5 раза меньше, чем при замкнутой цепи (рис. 4, в).

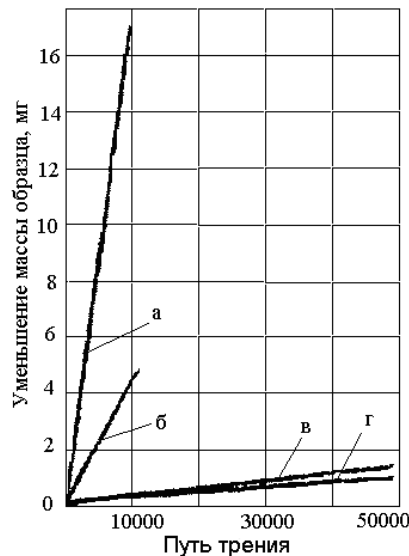


Рис. 4. Влияние электрического тока на износ образцов из оловянистой бронзы при трении о закалённую сталь [28]:
а — образец присоединён к положительному полюсу батареи; б — то же, к отрицательному полюсу; в — цепь термотока замкнута; г — образец изолирован

Аналогичное влияние электрического тока на износ подшипников установили Симпсон и Рассел [29]. Испытание шариковых подшипников в течение 24 часов с целью выяснения физического воздействия тока показало, что при максимальном токе 50 А дорожка качения на наружном кольце, соединённом с положительным полюсом источника постоянного тока, сильно темнеет, и на шариках также появлялись тёмные полосы. При перемене направления тока потемнение происходило на внутреннем кольце; внешний вид наружного кольца не изменялся, но шарики также покрывались тёмными полосами. При пропускании токов силой 25, 12, 6,3, 1 А и 500, 250 и

125 мА характер повреждений подшипниковых колец и шариков такой же, как при токе 50 А, но интенсивность почернения снижается с уменьшением тока. При токах меньше 3 А на кольцах не обнаружено следов повреждений, а на шариках появляется большое количество глубоких ямок. Шарiki при малых токах также темнеют, и с уменьшением тока до 125 мА, как указывают авторы, коррозионный питтинг (износ) их не уменьшается, а становится точечным.

Нами были рассмотрены в определённом смысле «пионерские» работы, авторы которых внесли существенный вклад в изучение проблемы — «электрического» износа пар трения. Естественно, что за почти сорокалетний период с момента публикации первых работ в области трибоэлектрики (термин И. В. Крагельского) проведено достаточно исследований применительно к этим и другим операциям механической обработки, например, зенкерования, фрезерованию, резьбо-нарезанию, зубообработке, дорнованию.

В табл. 1 представлены обобщённые данные этих исследований. Не акцентируя внимание на «электрическом режиме» пар трений, отметим огромный разброс экспериментальных данных по коэффициентам эффективности $K_{и}$ (табл. 1) в условиях трения: $K_{и} = 1,0...4,0$.

Таблица 1

Влияние постоянного электрического тока на износ при трении

№ п/п	Источник информации	Материалы пары	Режим трения	Электрические условия на контакте	Коэффициент снижения износа $K_{и}$
1	[26]	Сталь — платина	—	Шунтирование	2,2
		Алюминий по стали		Шунтирование	2,0
2	[4, 28, 30]	Бронза по стали	$V = 17,5$ м/с	Противоток 6 А	4,0
		P18 по Ст45	$V = 1,5—1,85$ м/с $P = 0,16$ МПа	Изоляция ПротивоЭДС	1,5 3,0
3	[31]	Никель по стали 2Х13	$V = 15$ м/с $N = 10$ Н	Ток $1 \cdot 10^{-5}$ А	2,0
		АРМКО-железо по стали 2Х13	$V = 15$ м/с $N = 10$ Н	Ток $1 \cdot 10^{-4}$ А	4,0
		Цинк по стали 2Х13	$V = 15$ м/с $N = 50$ Н	Шунтирование	2,8
4	[16, 32]	БРАЖ9-4 — закалённая Ст45	$V = 4$ м/с $P = 0,5$ МПа	Противоток $1 \cdot 10^{-3}$ А	1,25—2,3
	[16]	ШХ15 по ШХ15	$V = 0,33$ м/с $N = 1000$ Н	Отрицательный ток 10 А	1,2
5	[33]	БРОФ по БРОЦС	$V = 2,5$ м/с $P = 0,25$ МПа	Отрицательный ток 125 А/см ²	1,3
		БРОФ по Ст45	$V = 2,5$ м/с $P = 0,14$ МПа	Положительный ток 10 А/см ²	1,5
6	[34]	Со — Ag — MoS ₂ по стали 2Х13	$V = 0,3$ м/с $P = 0,9$ МПа	Изоляция	1,0
7	[35]	T15K6 по Ст45	$V = 4,2$ м/с	компенсация	1,6
8	[36]	T15K6 по Ст45	$V = 3,0$ м/с	изоляция	1,5
		P18 по Ст45	$V = 0,6$ м/с	изоляция	2,05

Подавляющее большинство исследователей изучали влияние трибоэлектрических процессов (термоЭДС и обусловленных ими токов) на износ трущихся пар, применяя следующие схемы:

1. Закорачивание шунтом цепи термотока, нагружение зоны трения.

2. Компенсация термоЭДС, возникающей при трении путём подведения к зоне контакта ЭДС, равной по величине естественно возникающей, но противоположной ей по знаку (противо-ЭДС) — результирующий термоток становится равным нулю.

3. Подведение к контакту ЭДС, противоположной по знаку и большей по величине, чем естественно возникающая ЭДС, при этом по цепи потечёт ток в направлении, противоположном термотоку (метод противоЭДС).

4. Включение в цепь результирующего триботока электрической цепочки типа RC для подавления импульсных разрядов.

Не останавливаясь на преимуществах и недостатках каждой из названных схем, отметим, что при их реализации авторы ставили совершенно конкретную цель — обосновать собственную точку зрения о природе влияния трибоэлектрических процессов на процесс изнашивания или уточнить обнаруженный эффект.

Вывод. Подводя предварительные итоги рассмотрения влияния «внутренних» энергетических воздействий на трение и износ, отметим, что данные явления изучаются на макро-, микро- и субмикроуровнях. Речь идёт, прежде всего, о влиянии трибоэлектрических процессов на износ, закономерности которых на каждом из указанных уровней до конца ещё не раскрыты.

На микроуровне также отмечаются синергетические явления, например, трибоэлектрическая (теплофизическая) совместимость структурных составляющих твёрдых сплавов на границе раздела фаз обеспечивается равенством работ выхода электронов карбидов и связки, а также коэффициентов их тепловой совместимости. Применительно к субмикроуровню синергетическим признаком может служить оптимальная плотность дислокаций, определяющая прочность, пластичность и износостойкость материала. Вероятные на сегодня методы воздействия на дислокационную структуру — внешнее электрическое поле и электрический ток.

Статья подготовлена в ходе работ по государственному контракту на выполнение научно-исследовательских работ с Минобрнауки России от 29 апреля 2011 года № 16.552.11.7027.

Библиографический список

1. Литвинов, В. Н. Физико-химическая механика избирательного переноса при трении / В. Н. Литвинов, Н. М. Михин, Н. Н. Мышкин. — Москва: Наука, 1979. — 187 с.
2. Свиридёнков, А. И. Акустические и электрические методы в триботехнике / А. И. Свиридёнков [и др.]. — Минск: Наука и техника, 1987. — 280 с.
3. Постников, С. И. Электрические явления при трении и резании / С. И. Постников. — Горький: Волго-Вятское кн. изд-во, 1975. — 280 с.
4. Электрические явления при трении и резании металлов: сб. ст. / под ред. М. М. Хрущёва, В. А. Бобровского. — Москва: Наука, 1969. — 119 с.
5. Белый, В. А. Об исследовании процесса переноса при трении полимеров / В. А. Белый [и др.] // Механика полимеров. — 1971. — № 4. — С. 750—752.
6. Белый, В. А. Проблема создания композиционных материалов и управление их фрикционными свойствами / В. А. Белый // Трение и износ. — 1982. — Т. 3. — № 3. — С. 389—395.
7. Белый, В. А. К вопросу о механизме трения наполненных полимеров / В. А. Белый, Б. И. Купчинов // О природе трения твёрдых тел: сб. ст. — Минск: Наука и техника, 1971. — С. 190—197.
8. Билик, Ш. М. Пары трения металл — пластмасса в машинах и механизмах / Ш. М. Билик. — Москва: Машиностроение, 1966. — 311 с.
9. Билик, Ш. М. Влияние направления стекания электрических зарядов, образующихся при трении, на износ металлополимерной пары / Ш. М. Билик, В. П. Цуркан // Теория смазочного действия и новые материалы: сб. ст. — Москва: Наука, 1985. — С. 222—224.

10. Колесников, В. И. Теплофизические процессы в металлополимерных трибосистемах / В. И. Колесников. — Москва: Наука, 2003. — 279 с.
11. Цуркан, В. П. Электрические явления в узлах трения металл — пластмасса / В. П. Цуркан // Пластмассы в подшипниках скольжения: сб. ст. — Москва: Наука, 1965. — С. 75—82.
12. Георгиевский, Г. А. Исследование кинетики электризации при скольжении фрикционных пластмасс по металлу / Г. А. Георгиевский, Л. А. Лебедев, Е. М. Бороздинский // Электрические явления при трении, резании и смазке твёрдых тел. — Москва: Наука, 1973. — С. 12—20.
13. Кретинин, О. В. Система контроля работоспособности инструментов при точении / О. В. Кретинин, А. П. Елепин, А. Р. Кварталов // Вестник машиностроения. — 1984. — № 7. — С. 41—43.
14. Кукоз, Ф. И. Трибоэлектрохимия: учеб. пособие / Ф. И. Кукоз, В. Ф. Кукоз. — Новочеркасск: УПЦ «Набла» ЮРГТУ (НПИ), 2003. — 399 с.
15. Кизельштейн, В. Я. Химико-механическая обработка металлов / В. Я. Кизельштейн. — Ленинград: Судостроение, 1969. — 154 с.
16. Электрические явления при трении, резании и смазке твёрдых тел: сб. ст. / под ред. В. А. Бобровского. — Москва: Наука, 1973. — 147 с.
17. Прейс, Г. А. Электрохимические явления при трении металлов / Г. А. Прейс, А. Г. Дзюб // Трение и износ. — 1980. — Т. 1. — № 2. — С. 217—235.
18. Гаркунов, Д. Н. Избирательный перенос в узлах трения / Д. Н. Гаркунов, И. В. Крагельский, А. А. Поляков. — Москва: Транспорт, 1969. — 103 с.
19. Кужаров, А. С. Трибохимия избирательного переноса: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / А. С. Кужаров. — Ростов-на-Дону: РИСХМ, 1991. — 42 с.
20. Трибоэлектрохимия эффекта безызносности. Влияние трения на электрохимические характеристики фрикционного контакта в начальной стадии избирательного переноса / А. С. Кужаров [и др.] // Трение и износ. — 1998. — Т. 19. — № 1. — С. 80—89.
21. Трибоэлектрохимия эффекта безызносности. Механизм формирования граничных слоёв на стали в самоорганизующейся трибологической системе «медь — глицерин — сталь» / А. С. Кужаров [и др.] // Трение и износ. — 1998. — Т. 19. — № 6. — С. 768—778.
22. Шпеньков, Г. П. Физико-химические процессы трения (применительно к избирательному переносу и водородному износу) / Г. П. Шпеньков. — Минск: Изд-во БГУ, 1978. — 208 с.
23. Поляков, А. Л. Исследование водородного износа / А. Л. Поляков, Ю. С. Симаков. — Москва: Наука, 1977. — 84 с.
24. Евдокимов, В. Д. Экзоэлектронная эмиссия при трении / В. Д. Евдокимов, Ю. И. Сёмов. — Москва: Наука, 1973. — 280 с.
25. Рыжкин, А. А. Влияние пластической деформации на тепловой режим зоны трения / А. А. Рыжкин, А. Н. Филипчук // Прогрессивные методы термического упрочнения в тракторном и сельскохозяйственном машиностроении: сб. науч. ст. — Ростов-на-Дону: РИСХМ, 1980. — С. 87—89.
26. Дубинин, А. Д. Трение и износ в деталях машин / А. Д. Дубинин. — Москва: Машгиз, 1952. — 121 с.
27. Дубинин, А. Д. Энергетика трения и износа деталей машин / А. Д. Дубинин. — Москва: Киев: Машгиз, 1963. — 137 с.
28. Гордиенко, П. Л. О влиянии электрического тока на износ при трении металлических тел / П. Л. Гордиенко, С. Л. Гордиенко // Вестник машиностроения. — 1952. — № 7. — С. 23—25.

29. Симпсон, Ф. Ф. Влияние магнитных полей и электрических токов на повреждение шариковых подшипников / Ф. Ф. Симпсон, Р. В. Рассел // Междунар. конф. по смазке и износу машин. — Москва: Машгиз, 1962.
30. Галей, М. Т. Исследование материалов и геометрии режущих инструментов на основе термоэлектрических явлений при резании и трении / М. Т. Галей // Основные направления и перспективы развития технологии приборостроения: сб. ст. — Москва: ОНТИПРИБОР, 1964. — С. 223—227.
31. Коршунов, Л. Г. Влияние электризации и малых постоянных токов на износ металлов при трении скольжения / Л. Г. Коршунов, Р. И. Минц // Физико-химическая механика материалов. — 1967. — Т. 3. — № 4. — С. 392—396.
32. Электрохимические процессы при трении и их использование для борьбы с износом: мат-лы всесоюз. конф. — Одесса, 1973. — 280 с.
33. Избирательный перенос при трении и его экономическая эффективность. — Москва: МДНТП им. Дзержинского, 1972. — 252 с.
34. Глузский, Я. Л. Влияние трибоэлектрических явлений на работоспособность самосмазывающихся композиций на основе кобальта / Я. Л. Глузский // Проблемы трения и изнашивания. — 1976. — № 10. — С. 64—68.
35. Аваков, А. А. Исследование эффектов повышения износостойкости твердосплавных режущих пластинок / А. А. Аваков, Ю. С. Дубров, Г. С. Николаева // Известия вузов. Машиностроение. — 1965. — № 3. — С. 55—58.
36. Рыжкин, А. А. Термодинамические основы повышения износостойкости инструментальных режущих материалов: дис. ... д-ра техн. наук. — Киев, 1985. — 452 с.

Материал поступил в редакцию 16.12.2011.

References

1. Litvinov, V. N. Fiziko-khimicheskaya mexanika izbiratel'nogo perenosa pri trenii / V. N. Litvinov, N. M. Mixin, N. N. My'shkin. — Moskva: Nauka, 1979. — 187 s. — In Russian.
2. Sviridyonok, A. I. Akusticheskie i elektricheskie metody v tribotekhnike / A. I. Sviridyonok [i dr.]. — Minsk: Nauka i tekhnika, 1987. — 280 s. — In Russian.
3. Postnikov, S. I. Elektricheskie yavleniya pri trenii i rezanii / S. I. Postnikov. — Gor'kiy: Volgo-Vyatskoe kn. izd-vo, 1975. — 280 s. — In Russian.
4. Elektricheskie yavleniya pri trenii i rezanii metallov: sb. st. / pod red. M. M. Xrushhyova, V. A. Bobrovskogo. — Moskva: Nauka, 1969. — 119 s. — In Russian.
5. Belyj, V. A. Ob issledovanii processa perenosa pri trenii polimerov / V. A. Belyj [i dr.] // Mexanika polimerov. — 1971. — # 4. — S. 750—752. — In Russian.
6. Belyj, V. A. Problema sozdaniya kompozicionnykh materialov i upravlenie ikh frikcionnyimi svojstvami / V. A. Belyj // Trenie i iznos. — 1982. — T. 3. — # 3. — S. 389—395. — In Russian.
7. Belyj, V. A. K voprosu o mexanizme treniya napolnennykh polimerov / V. A. Belyj, B. I. Kupchinov // O prirode treniya tvordyx tel: sb. st. — Minsk: Nauka i tekhnika, 1971. — S. 190—197. — In Russian.
8. Bilik, Sh. M. Parye treniya metall — plastmassa v mashinax i mexanizmax / Sh. M. Bilik. — Moskva: Mashinostroenie, 1966. — 311 s. — In Russian.
9. Bilik, Sh. M. Vliyanie napravleniya stekaniya elektricheskix zaryadov, obrazuyushhixsya pri trenii, na iznos metallopolimernoj pary / Sh. M. Bilik, V. P. Czurkan // Teoriya smazochного dejstviya i novye materialy: sb. st. — Moskva: Nauka, 1985. — S. 222—224. — In Russian.

10. Kolesnikov, V. I. Teplofizicheskie processy` v metallopolimerny`x tribosistemax / V. I. Kolesnikov. — Moskva: Nauka, 2003. — 279 s. — In Russian.
11. Czurkan, V. P. E`lektricheskie yavleniya v uzlax treniya metall — plastmassa / V. P. Czurkan // Plastmassy` v podshipnikax skol`zheniya: sb. st. — Moskva: Nauka, 1965. — S. 75—82. — In Russian.
12. Georgievskij, G. A. Issledovanie kinetiki e`lektrizacii pri skol`zhenii frikcionny`x plastmass po metallu / G. A. Georgievskij, L. A. Lebedev, E. M. Borozdinskij // E`lektricheskie yavleniya pri trenii, rezanii i smazke tvordy`x tel. — Moskva: Nauka, 1973. — S. 12—20. — In Russian.
13. Kretinin, O. V. Sistema kontrolya rabotosposobnosti instrumentov pri tochenii / O. V. Kretinin, A. P. Elepin, A. R. Kvartalov // Vestnik mashinostroeniya. — 1984. — # 7. — S. 41—43. — In Russian.
14. Kukoz, F. I. Triboe`lektroximiya: ucheb. posobie / F. I. Kukoz, V. F. Kukoz. — Novocherkassk: UPCz «Nabla» YuRGU (NPI), 2003. — 399 s. — In Russian.
15. Kizel`shtejn, V. Ya. Ximiko-mexanicheskaya obrabotka metallov / V. Ya. Kizel`shtejn. — Leningrad: Sudostroenie, 1969. — 154 s. — In Russian.
16. E`lektricheskie yavleniya pri trenii, rezanii i smazke tvordy`x tel: sb. st. / pod red. V. A. Bobrovskogo. — Moskva: Nauka, 1973. — 147 s. — In Russian.
17. Prejs, G. A. E`lektroximicheskie yavleniya pri trenii metallov / G. A. Prejs, A. G. Dzyub // Trenie i iznos. — 1980. — T. 1. — # 2. — S. 217—235. — In Russian.
18. Garkunov, D. N. Izbiratel`ny`j perenos v uzlax treniya / D. N. Garkunov, I. V. Kragel`skij, A. A. Polyakov. — Moskva: Transport, 1969. — 103 s. — In Russian.
19. Kuzharov, A. S. Triboximiya izbiratel`nogo perenosa: avtoref. dis. ... d-ra texn. nauk / A. S. Kuzharov. — Rostov-na-Donu: RISXM, 1991. — 42 s. — In Russian.
20. Triboe`lektroximiya e`ffekta bezy`znosnosti. Vliyanie treniya na e`lektroximicheskie xarakteristiki frikcionnogo kontakta v nachal`noj stadii izbiratel`nogo perenosa / A. S. Kuzharov [i dr.] // Trenie i iznos. — 1998. — T. 19. — # 1. — S. 80—89. — In Russian.
21. Triboe`lektroximiya e`ffekta bezy`znosnosti. Mexanizm formirovaniya granichny`x slojov na stali v samoorganizuyushhejsya tribologicheskoy sisteme «med` — glicerin — stal`» / A. S. Kuzharov [i dr.] // Trenie i iznos. — 1998. — T. 19. — # 6. — S. 768—778. — In Russian.
22. Shpen`kov, G. P. Fiziko-ximicheskie processy` treniya (primenitel`no k izbiratel`nomu perenosu i vodorodnomu iznosu) / G. P. Shpen`kov. — Minsk: Izd-vo BGU, 1978. — 208 s. — In Russian.
23. Polyakov, A. L. Issledovanie vodorodnogo iznosa / A. L. Polyakov, Yu. S. Simakov. — Moskva: Nauka, 1977. — 84 s. — In Russian.
24. Evdokimov, V. D. E`kzoe`lektronnaya e`missiya pri trenii / V. D. Evdokimov, Yu. I. Syomov. — Moskva: Nauka, 1973. — 280 s. — In Russian.
25. Ry`zhkin, A. A. Vliyanie plasticheskoy deformacii na teplovoj rezhim zony` treniya / A. A. Ry`zhkin, A. N. Filipchuk // Progressivny`e metody` termicheskogo uprochneniya v traktornom i sel`skoxozyajstvennom mashinostroenii: sb. nauch. st. — Rostov-na-Donu: RISXM, 1980. — S. 87—89. — In Russian.
26. Dubinin, A. D. Trenie i iznos v detalyax mashin / A. D. Dubinin. — Moskva: Mashgiz, 1952. — 121 s. — In Russian.
27. Dubinin, A. D. E`nergetika treniya i iznosa detalej mashin / A. D. Dubinin. — Moskva: Kiev: Mashgiz, 1963. — 137 s. — In Russian.
28. Gordienko, P. L. O vliyanii e`lektricheskogo toka na iznos pri trenii metallicheskih tel / P. L. Gordienko, S. L. Gordienko // Vestnik mashinostroeniya. — 1952. — # 7. — S. 23—25. — In Russian.

29. Simpson, F. F. Vliyanie magnitny`x polej i e`lektricheskix tokov na povrezhdenie sharikov`x podshipnikov / F. F. Simpson, R. V. Rassel // Mezhdunar. konf. po smazke i iznosu mashin. — Moskva: Mashgiz, 1962. — In Russian.
30. Galej, M. T. Issledovanie materialov i geometrii rezhushhix instrumentov na osnove termoe`lektricheskix yavlenij pri rezanii i trenii / M. T. Galej // Osnovny`e napravleniya i perspektivy` razvitiya tekhnologii priborostroeniya: sb. st. — Moskva: ONTIPRIBOR, 1964. — S. 223—227. — In Russian.
31. Korshunov, L. G. Vliyanie e`lektrizacii i maly`x postoyanny`x tokov na iznos metallov pri trenii skol`zheniya / L. G. Korshunov, R. I. Mincz // Fiziko-ximicheskaya mexanika materialov. — 1967. — T. 3. — # 4. — S. 392—396. — In Russian.
32. E`lektroximicheskie processy` pri trenii i ix ispol`zovanie dlya bor`by` s iznosom: mat-ly` vsesoyuz. konf. — Odessa, 1973. — 280 s. — In Russian.
33. Izbiratel`ny`j perenos pri trenii i ego e`konomicheskaya e`ffektivnost`. — Moskva: MDNTP im. Dzerzhinskogo, 1972. — 252 s. — In Russian.
34. Gluzskij, Ya. L. Vliyanie triboe`lektricheskix yavlenij na rabotosposobnost` samosmazy`vayushhixsya kompozicij na osnove kobal`ta / Ya. L. Gluzskij // Problemy` treniya i iznashivaniya. — 1976. — # 10. — S. 64—68. — In Russian.
35. Avakov, A. A. Issledovanie e`ffektov pov`sheniya iznosostojkosti tverdosplavny`x rezhushhix plastinok / A. A. Avakov, Yu. S. Dubrov, G. S. Nikolaeva // Izvestiya vuzov. Mashinostroenie. — 1965. — # 3. — S. 55—58. — In Russian.
36. Ry`zhkin, A. A. Termodinamicheskie osnovy` pov`sheniya iznosostojkosti instrumental`ny`x rezhushhix materialov: dis. ... d-ra texn. nauk. — Kiev, 1985. — 452 s. — In Russian.

ON FRICTIONAL ELECTRIC PHENOMENA

A. A. Ryzhkin, V. E. Burlakova

(Don State Technical University)

The literature data and the authors' integrated study results of the electric processes in the frictional contact zone are generalized.

Keywords: *friction, wear, contact electrification, electrochemical and electrokinetic phenomena, triboelectric effects.*