

Прямоугольные электрические соединители.

Расчет контактов электрических соединителей на износ

В статье вместе с анализом природы трения и износа представлены необходимые для практического использования расчетные зависимости по определению эпюр удельных давлений в контактной паре и величины износа, связывающие воедино внешние характеристики процессов и свойства контактирующих поверхностей. Даны рекомендации по расчету контактных пар электрических соединителей на износ.

Леонид Сафонов
Александр Сафонов

edet@online.debryansk.ru

Введение

Разработка инженерной методики расчета деталей и контактных пар электрических соединителей на долговечность по износу позволит решить одну из основных проблем надежности — прогнозирование изменения работоспособности электрических соединителей в процессе эксплуатации.

В настоящее время выполнен ряд теоретических исследований, которые освещают отдельные стороны инженерных расчетов на износ. Необходимо создание общей методики расчета соединителей на износ. Данная методика должна состоять из последовательных этапов, когда уже на стадии проектирования на основе эскизного проекта и требований ТЗ в части условий эксплуатации, воздействия внешних факторов, электрических параметров и других требований следует рассчитать срок службы отдельных элементов и безотказность работы электрического соединителя и прогнозировать потерю соединителем работоспособности при различных условиях эксплуатации.

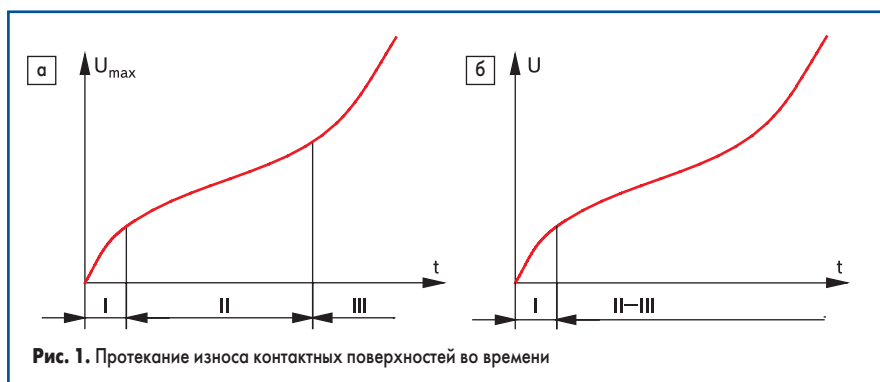
Наука об изнашивании материалов, как правило, изучает те явления, которые происходят на данном участке поверхности трения, то есть рассматривает микрокартину явлений. Так решаются задачи о характере контактирования и взаимодействия поверх-

ностей, изучаются процессы разрушения металлов покрытий, исследуются структурные изменения в их поверхностных слоях и т. д.

Но кроме этого необходимо рассмотреть микрокартину процессов, происходящих на поверхности трения, и установить зависимости, определяющие распределение удельных контактных давлений и линейного износа на поверхностях трения, установить изменение взаимного положения сопряженных деталей, которое произошло в результате их изнашивания. Именно эти данные, которые являются следствием микроявлений на поверхности трения, нужны разработчикам и эксплуатационникам электрических соединителей и радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) для решения инженерных задач. Они связывают износ контактирующих поверхностей с износом деталей и нарушением работоспособности электрических соединителей с заявленными техническими характеристиками в течение необходимого срока эксплуатации.

Закономерности процесса изнашивания

Расчет на износ деталей электрических соединителей должен базироваться на физических закономерностях износа материалов, в первую очередь материалов покрытий деталей, применяемых для конкретных условий эксплуатации. При этом, во-первых, необходим расчет граничных условий, определяющих вид изнашивания всех пар трения. На основании этого расчета необходимо изменить параметры тех пар трения, в которых возможно возникновение недопустимых видов износа (например, молекулярного схватывания). Во-вторых, необходимо иметь расчет интенсивности изнашивания покрытий контактных пар. Поскольку каждый из параметров, определяющих интенсивность изнашивания, имеет дисперсию, применяемую аналитическую зависимость необходимо рассматривать как функцию случайных аргументов.



Безусловно, нужно знать закономерности протекания износа во времени для конкретных контактных пар. Для основной массы контактных пар электрических соединителей кривые износа имеют вид, представленный на рис. 1.

В период I изнашивания происходит проработка контактирующих поверхностей контактов — изменение микро- и макрогеометрии поверхностей. После периода приработки, который желательно сокращать, идет период II установившегося (нормального) износа контактов. В ряде случаев при достижении определенной степени износа может происходить изменение условий изнашивания, приводящих к интенсивному (катастрофическому) износу (период III, рис. 1а). Изменение условий может быть связано с полным износом на отдельных участках покрытия, интенсивным процессом образования окисных пленок, увеличением в зоне контактирования абразивной пыли и т. п. Иногда при протекании процесса износа отсутствует резкий переход между II и III периодами износа (рис. 1б).

При расчетах для большинства случаев можно принять линейную зависимость между временем изнашивания t и величиной износа U , то есть считать, что в период нормальной эксплуатации соединителя скорость изнашивания γ остается постоянной:

$$\gamma = U/t = \text{const.} \quad (1)$$

Основные факторы, определяющие скорость изнашивания, — это удельное давление p и скорость относительного скольжения v . Зависимость износа от p и v определяется, прежде всего, видом изнашивания; каждому виду соответствует определенная закономерность. Установлено, что для контактных пар электрических соединителей основным видом износа является абразивный. Это связано с тем, что режимы эксплуатации прямоугольных электрических соединителей не предусматривают больших удельных контактных давлений и высоких скоростей относительного скольжения, температура эксплуатации находится в пределах $-60...+150$ °С.

Закон М. М. Хрущева устанавливает, что для абразивного изнашивания линейный износ U прямо пропорционален удельному давлению p на поверхности трения и пути трения S и не зависит от скорости относительно скольжения:

$$U = k \cdot p \cdot S, \quad (2)$$

где k — коэффициент, характеризующий износостойкость материалов и условия работы конкретной пары трения (степень защиты поверхности от загрязнений, климатические условия эксплуатации и другие), Па⁻¹. На значение коэффициента в первую очередь влияют характеристики применяемых материалов пары и геометрия соприкасающихся поверхностей (модуль упругости, твердость, характеристики прочности и усталости, параметры опорной поверхности и др.).

Разделив обе части равенства (2) на время работы (время прохождения пути трения), получим скорость изнашивания:

$$\gamma = k \cdot p \cdot v. \quad (3)$$

Зависимость скорости или интенсивности изнашивания I от режима работы контактной пары, прочностных характеристик материала и параметров опорных поверхностей контактов наиболее желательно выразить на основании теоретических предпосылок о характере взаимодействия поверхностей, однако данная задача очень сложная. В связи с этим представляет большой интерес метод И. В. Крагельского, который рассматривает износ без смазки как результат повторной деформации слоев шероховатых поверхностей, при этом учитывается, что вследствие шероховатости и волнистости поверхностей контакт происходит на отдельных участках номинальной площади касания.

Разрушение поверхностей трения

Разрушение поверхностей трения обычно проявляется в отделении частиц материала, размер которых измеряется в пределах от долей микрометров до нескольких микрометров. Отделение этих частиц, как правило, происходит вследствие многократного воздействия нагрузок и температурных импульсов на единичные неровности. В результате постоянного накопления необратимых изменений возникает неоднородность структуры, напряженного состояния, то есть образуются концентраторы, далее возникают микротрещины, которые, развиваясь, смыкаются и образуют частицы износа. Практически во всех случаях разрушению предшествует изменение свойств поверхностного слоя материалов. Естественно, что в этих условиях подготовка к разрушению материала и характер разрушения весьма многообразны. Это нашло отражение в ряде классификаций видов износа.

Вначале такие классификации были построены по внешним признакам, например классификация Бринелля. Развернутую классификацию видов износа дали Лоренц и Зайцев. Бурвелл и Странг предлагают классификацию, в которой учитывают в одних случаях характер взаимодействия поверхностей на трение, в других — характер протекающих на поверхностях процессов. Затем ученые Костецкий, Хрущов и др. предложили свои классификации. Одной из последних является классификация Петерсона.

Так до сих пор еще четко не выявлены признаки, по которым надлежит классифицировать износ, и соответственно не создано и единой классификации видов износа. Наиболее приемлемой для изучения и расчета контактных пар на износ является классификация видов износа И. В. Крагельского, основанная на характере взаимодействия и разрушения поверхностей.

Характер нарушения фрикционной связи (такой связью называют единичное пятно касания, образовавшееся при одновременном действии нормальных и тангенциальных нагрузок и исчезающее при снятии нормальной нагрузки) и комплекс процессов, протекающих в поверхностных слоях и микрообъемах, зависит от ряда факторов: геометрических, механических, физических и химических. Одним из наиболее важных факторов является геометрический, характеризуемый отношением глубины внедрения или величины сжатия к радиусу единичной неровности (h/r). Эта характеристика позволяет различать упругий контакт, пластический и микрорезание. Второй существенный фактор — физико-механический, характеризуемый отношением тангенциальной прочности молекулярной связи к пределу текучести материала покрытия (τ/σ_T). При этом следует различать два случая:

- нарушение связи по поверхности раздела двух контактирующих поверхностей или по пленкам, покрывающим эти поверхности (когда не затрагиваются слои покрытия контактных пар);
- нарушение связи не по поверхности раздела двух контактирующих поверхностей (когда процессы происходят в металле покрытия); в этом случае внешнее трение переходит во внутреннее.

Учитывая изложенное, предлагаем различать следующие виды фрикционной связи (рис. 2):

1. Упругое оттеснение материала выступами контртела имеет место, когда действующая нагрузка и адгезия не приводят к возникновению в зоне контакта напряжений, превышающих предел текучести. Износ в этом случае возможен лишь в результате фрикционной усталости (рис. 2а).
2. Пластическое оттеснение материала происходит, если контактные напряжения достигают предела текучести, но материал обтекает внедрившиеся выступы контртела. Износ в данном случае будет результатом малоциклового фрикционной усталости (рис. 2б).
3. Микрорезание происходит, если контактные напряжения или деформации достигают разрушающих значений. Нарушается ре-

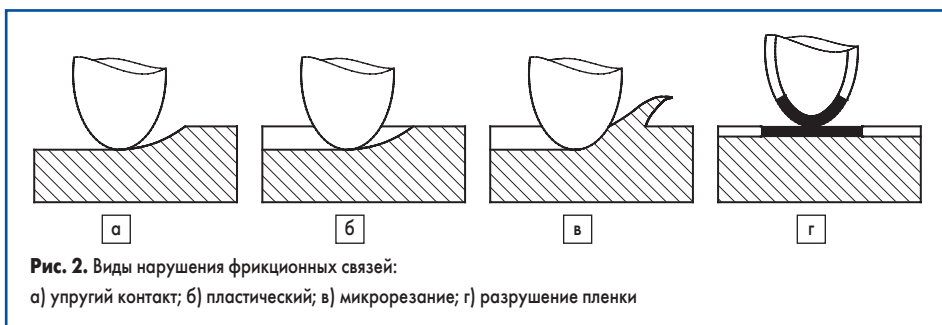


Рис. 2. Виды нарушения фрикционных связей:

а) упругий контакт; б) пластический; в) микрорезание; г) разрушение пленки

жим обтекания выступов деформируемым материалом. Разрушение в этом случае происходит при первых же актах взаимодействия (рис. 2в).

- Адгезионное нарушение фрикционной связи не приводит непосредственно к разрушениям, но увеличивает величину действующих на контакте напряжений и деформаций, то есть сопутствует усталостным процессам.
- Когезионный отрыв возникает, если прочность фрикционной связи выше прочности лежащего ниже материала и происходит глубинное вырывание. Износ при этом, как и в случае микрорезания, происходит после первых же актов взаимодействия.

Износ будет минимальным при упругом контакте соприкасающихся неровностей, в этом случае коэффициент трения и теплообразования также минимальны. Геометрическая конфигурация неровностей меняется до тех пор, пока они не будут находиться в режиме упругого деформирования. Можно предположить, что каждая фрикционная система будет стремиться к реализации в зоне трения упругого контакта. Устанавливаются пределы действия процессов изнашивания. Так, при механическом взаимодействии поверхностей (молекулярные связи не учитываются) в зависимости от глубины взаимного внедрения микровыступов трущихся поверхностей может иметь место их упругое или пластическое деформирование или одновременно упруго-пластическое деформирование, а начиная с некоторых критических значений — микрорезание. Для каждого вида взаимодействия характерны свои закономерности изнашивания. При упругом контакте износ связан с давлением степенной зависимостью, причем показатель степени больше единицы, при пластическом контакте пропорционален удельному давлению.

Знание закономерности изнашивания — необходимое условие для расчета контактных пар на износ. Чем достовернее данная закономерность процесса изнашивания, чем глубже она связана с физическими параметрами материала, с характеристиками его поверхностного слоя и с внешними силовыми и кинематическими факторами, тем точнее будет расчет работоспособности данного сопряжения и прогнозирование его долговечности по износу.

Износ материала покрытия контактной пары

Износ материала покрытия контактов может характеризоваться скоростью изнашивания γ или интенсивностью изнашивания I . Интенсивность изнашивания выражается безразмерной величиной: как отношение толщины истертого слоя к пути трения.

Сам износ материала покрытия может выражаться в линейных единицах (глубина истертого слоя) или в весовых (потеря веса при износе поверхности).

Для оценки износа поверхности основной характеристикой является линейный износ U — изменение размера детали в направлении,



Рис. 3. Схема износа (линейного):

A — размер детали до износа; B — размер детали после износа; U — величина износа.

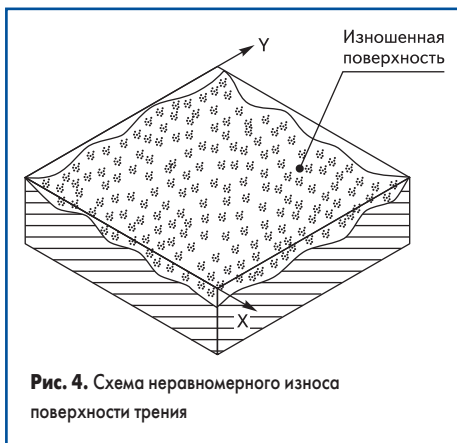


Рис. 4. Схема неравномерного износа поверхности трения

перпендикулярном к поверхности трения (рис. 3).

В общем случае износ распределяется по поверхности трения неравномерно, поэтому $U = f(x, y)$, где x и y — координаты поверхности трения (рис. 4).

Износ контактной пары происходит при трении двух сопряженных поверхностей, и изнашиваются обе поверхности одновременно. Это приводит к изменению взаимного положения контактов, контактного давления и других электрических параметров. Износ контактной пары является характеристикой, которая непосредственно связана с потерей контактной пары и соединителем их начальных рабочих характеристик (контактного давления, переходного сопротивления, перегрева контактов, усилия сочленения соединителя и др.).

Определение эпюры удельных давлений в контактной паре

Для расчета контактной пары трения на износ необходимо в первую очередь знать характер эпюры удельных давлений между ножевым и гнездовым контакстом. На практике очень трудно обеспечить приложение силы в центре пружинящего элемента контакта. Поэтому в общем случае, при определении нагрузки контакта силой, задают некоторое ее смещение x_p (рис. 5а). Определим эпюру удельных давлений и наибольшее значение давления P_{max} .

После сочленения гнездовой контакт с определенным усилием P прижимается к ножевому контакту. В результате деформации поверхностных слоев сопряженных контактов и износа в процессе сочленения/расчленения происходит их сближение, которое можно охарактеризовать величинами Δ_1 и Δ_2 . Очевидно, что в изображенном на рис. 5а случае $\Delta_1 > \Delta_2$, так как сила контактного давления P смещена в сторону Δ_1 .

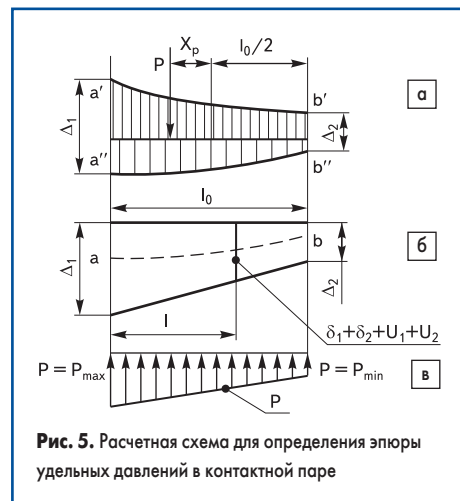


Рис. 5. Расчетная схема для определения эпюры удельных давлений в контактной паре

Новые поверхности гнездового и ножевого контактов, образованные в результате деформации поверхностных слоев и их износа в процессе сочленения/расчленения, могут быть и криволинейными. Однако образующие $a'b'$ и $a''b''$ обязательно должны совпадать, так как это является условием касания поверхностей гнездового и ножевого контактов. Поэтому после совмещения $a'b'$ и $a''b''$ получаем как бы взаимное внедрение деформированного и изношенного объема одного тела в другое. Полученная область взаимного внедрения является трапецией (рис. 5б). Каждая ордината этой трапеции состоит из суммы износов (U_1 и U_2) и деформаций (δ_1 и δ_2) контактов в данной точке.

Если считать, что износ пропорционален удельному давлению p , что характерно для абразивного изнашивания, и что деформация поверхностных слоев контактов также пропорциональна p , то эпюра удельных давлений будет представлять собой трапецию (рис. 5в). Зная характер эпюры, из уравнений статики легко определить максимальное p_1 и минимальное p_2 удельные давления. Проектируя силы на вертикальную ось, получим:

$$[(p_1 + p_2)/2] \times l_0 \times a = P, \quad (4)$$

где l_0 — длина контактирующей части гнездового контакта, м; a — ширина контактирующей части гнездового контакта, м.

Берем сумму моментов относительно средней точки:

$$[(p_1 + p_2)/2] \times l_0 \times a \times (l_0/6) = P \times x_p. \quad (5)$$

Решая систему уравнений (4) и (5), получим:

$$p_1 = \frac{P}{a \times l_0} \left(1 + 6 \frac{x_p}{l_0} \right), \quad (6)$$

$$p_2 = \frac{P}{a \times l_0} \left(1 + 6 \frac{x_p}{l_0} \right). \quad (7)$$

Теоретически можно предположить, что сила, с которой прижимается гнездовой контакт к ножевому контакту, действует строго симметрично относительно гнездового контакта, то есть $x_p = 0$, в этом случае:

$$p_1 = p_2 = P/(a \times l_0) = p_{cp} = \text{const}, \quad (8)$$

то есть эпюра удельных давлений будет представлять собой прямоугольник с ординатой, равной:

$$p = P/(a \times l_0). \quad (9)$$

Определение формы изношенной поверхности контактной пары

В процессе сочленения/расчленения соединителя гнездовой контакт совершает постоянный ход по длине ножевого контакта. Задачу расчета на изнашивание элементов контактной пары в данном случае можно решить с достаточной для практики точностью, исходя из следующих условий:

1. Согласно закону Хрущова при абразивном изнашивании величина износа пропорциональна пути трения и величине удельного давления (2).
2. Начальная эпюра удельных давлений при изнашивании сохраняется, то есть ее перераспределение в результате износа контактных поверхностей незначительно.
3. Известен путь трения (относительное движение вилочного и розеточного контактов).

При определении формы изношенной поверхности и величины износа поверхностей контактной пары — гнездового и ножевого контактов — примем следующие обозначения (рис. 6):

- l_0 — длина гнездового контакта (его рабочей части), м;
- $(L+l_0)$ — длина ножевого контакта (его рабочей части), м;
- $U_{гнезд}(l)$ — искомая величина линейного износа точки поверхности гнездового контакта с координатой $l \in [0, l_0]$, м;
- $U_I(x)$ — искомая величина линейного износа точки поверхности ножевого контакта с координатой $x \in [0, L]$ (участок I), м;
- $U_{II}(x)$ — искомая величина линейного износа точки поверхности ножевого контакта с координатой $x \in [0, L+l_0]$ (участок II), м;
- $p(l) = f(l)$ — эпюра давления на гнездовом контакте, Па;
- N — количество циклов сочленения/расчленения (совместно с путем трения за один цикл можно определить путь трения за все время работы);
- $k_{нож}$ — коэффициент износа ножевого контакта, Па⁻¹;
- $k_{гнезд}$ — коэффициент износа гнездового контакта, Па⁻¹.

Рассмотрим методику определения функций $U_I(x)$, $U_{II}(x)$ и $U_{гнезд}(l)$, исходя из установленных выше условий.

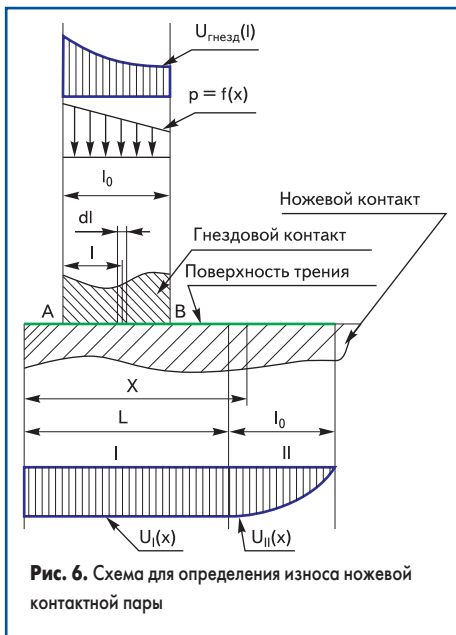


Рис. 6. Схема для определения износа ножевой контактной пары

Функция $U_{гнезд}(l)$ определяется следующим образом: так как каждая точка гнездового контакта изнашивается на протяжении всего пути трения, на нее действует постоянное давление, определяемое уравнением $p = f(l)$. Путь трения зависит от координаты l , так как точка В гнездового контакта (рис. 6) взаимодействует с ножевым контактом раньше других точек при сочленении соединителя и заканчивает позже всех при расчленении. Исходя из этого, путь трения за один цикл сочленения/расчленения будет выглядеть следующим образом:

$$S'_{гнезд}(l) = 2(L+l), \quad (10)$$

где $S'_{гнезд}(l)$ — путь трения точки рабочей поверхности гнездового контакта с координатой l . Полный путь трения за N циклов работы:

$$S_{гнезд}(l) = S'_{гнезд}(l) \times N = 2N(L+l). \quad (11)$$

Тогда линейный износ гнездового контакта за N циклов:

$$U_{гнезд}(l) = k_{гнезд} \times S_{гнезд}(l) \times p(l) = 2N \times k_{гнезд} \times p(l) \times (L+l). \quad (12)$$

Для определения функции $U_I(x)$ рассмотрим, как изнашивается участок ножевого контакта с координатой x (рис. 6). При перемещении гнездового контакта этот участок ножевого контакта изнашивается под действием давлений, определяемых той частью эпюры $p(l)$, которая проходит над ним. Каждый элемент эпюры давлений длиной dl с координатой l при однократном перемещении «изнашивает» ножевой контакт на величину, пропорциональную величине $p(x) \times dl$. Тогда износ

$$U_{II}(x) = 2N \times k_{нож} \int_0^{l_0} p(l) \times dl = 2N \times k_{нож} \int_0^{l_0} \left[p_A + \frac{(p_B - p_A)}{l_0} l \right] dl = N \times k_{нож} \left[x^2 \frac{p_A - p_B}{l_0} + x \left(2L \frac{p_A - p_B}{l_0} - 2p_A \right) + (p_A + p_B) l_0 + 2p_A \times L + \frac{p_A - p_B}{l_0} L^2 \right]. \quad (19)$$

на участке I ножевого контакта от одного цикла сочленения/расчленения будет равен суммарному воздействию всех элементарных участков гнездового контакта:

$$U'_I = 2k_{нож} \int_0^{l_0} p(l) \times dl. \quad (13)$$

Таким образом, износ на участке I ножевого контакта за N циклов сочленения/расчленения не зависит от координаты x и будет равен:

$$U_I = 2N \times k_{нож} \int_0^{l_0} p(l) \times dl. \quad (14)$$

Несколько сложнее определить величину износа на участке II ножевого контакта, так как не вся рабочая поверхность гнездового контакта взаимодействует с его точками. Рассмотрим износ точки ножевого контакта с координатой x (рис. 6). Через нее «проходит» лишь часть рабочей поверхности гнездового контакта с координатами $l > x - L$. Поэтому износ за N циклов работы будет выглядеть следующим образом:

$$U_{II}(x) = 2N \times k_{нож} \int_{x-L}^{l_0} p(l) \times dl. \quad (15)$$

Формулы (12, 14, 15) являются общими для различных случаев зависимости $p(l)$. Покажем, как будут выглядеть эти зависимости при линейном распределении давления по длине площадки контактирования, рассмотренном в предыдущем пункте. Пусть давление, обеспечиваемое гнездовым контактом, будет задано:

$$p(l) = p_A + \frac{(p_B - p_A)}{l_0} l, \quad (16)$$

где p_A и p_B — величины давления в точках А и В гнездового контакта.

Тогда величина линейного износа гнездового контакта будет выглядеть так:

$$U_{гнезд}(l) = 2N \times k_{гнезд} \left[p_A + \frac{(p_B - p_A)}{l_0} l \right] \times (L+l). \quad (17)$$

Износ поверхности участка I ножевого контакта будет иметь вид:

$$U_I = 2N \times k_{нож} \int_0^{l_0} p(l) \times dl = 2N \times k_{нож} \int_0^{l_0} \left[p_A + \frac{(p_B - p_A)}{l_0} l \right] dl = N \times k_{нож} \times l_0 (p_A + p_B). \quad (18)$$

Соответственно уравнение изношенной поверхности для участка II (19).

В полученных общих зависимостях износа поверхностей контактной пары (формулы 12, 14, 15) учтено влияние основных факторов на форму изношенной поверхности:

- $k_{\text{нож}}$ и $k_{\text{гнезд}}$ — отражают износостойкость материалов покрытия и условия изнашивания;
- N и L — интенсивность работы соединителя во время эксплуатации;
- $p(l)$ — отражает конструкцию контактной пары, то есть расположение сил и характер нагружения (характер эпюры давлений).

Пользуясь полученными зависимостями, можно проанализировать влияние отдельных факторов на величину и характер износа поверхностей $U_{\text{гнезд}}(l)$, $U_I(x)$ и $U_{II}(x)$, в каждом конкретном случае указать наиболее эффективные пути для уменьшения величины износа и получения более равномерной формы изношенной поверхности.

Определение величины износа ножевой контактной пары с контактированием по типу «цилиндр – плоскость»

Рассмотрим вариант конструкции контактной пары, в которой взаимодействие осуществляется по типу «цилиндр – плоскость» (рис. 7). Интересна в данном случае разработка методики определения характеристик износа для розеточного контакта, так как его рабочая поверхность трения представляет собой образующую цилиндра (рис. 8), расположенную перпендикулярно направлению относительного перемещения контактов при сочленении/расчленении.



Рис. 7. Конструкция контактной пары

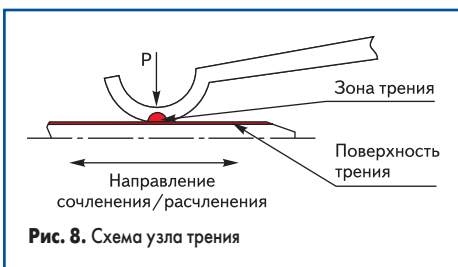


Рис. 8. Схема узла трения

При данной конструкции контактной пары и при условии, что контактирующие поверхности являются абсолютно твердым телом, контактирование будет проходить по прямой линии. В реальных условиях, при взаимодействии контактов с определенным усилием и наличием упруго-пластических деформаций, контактирование будет происходить по площадке определенной длины. Длина площадки контактирования непосредственно зависит от величины контактного давле-

ния, поверхностной твердости материалов покрытия, а также микро- и макрогеометрических характеристик контактирующих поверхностей.

Для большинства контактных пар аналогичной конструкции единичное усилие (усилие сочленения/расчленения контактной пары) находится в пределах 15–30 г. Если учесть, что большинство розеточных контактов изготавливается из цветного ленточного проката (материалы БрОФ, БрКМЦ, БрБ2 и др.) с повышенной отделкой качества поверхности и защитными покрытиями благородными металлами (Au, Ag, Pd и др.), которые наносятся гальваническим способом, то с достаточно большой степенью точности можно измерить и распространить на контактные пары с вышеуказанными техническими характеристиками первоначальную длину площадки контакта. Практические замеры показали, что она находится в пределах 8–12 мкм. Для практических расчетов имеет смысл принять среднюю величину первоначальной площадки контактирования 10 мкм.

В результате последующих сочленений/расчленений, вплоть до полного износа покрытия контакта, длина площадки контактирования будет непрерывно увеличиваться.

Для упрощения методики расчета износа контакта примем определенные упрощения:

- Зависимость между временем изнашивания и величиной износа будем считать линейной, то есть:

$$\gamma = U/t, \quad (20)$$

где γ — скорость изнашивания, м/с; U — линейный износ, м; t — время изнашивания, с.

- Будем считать, что в течение одного цикла сочленения/расчленения длина площадки контактирования не изменяется, а увеличение ее длины происходит скачкообразно между циклами.
- Контакты прижимаются друг к другу силой P (рис. 9). Для выполнения расчета примем, что сила P равномерно распределена по площадке контактирования, поэтому все ее участки нагружены давлением:

$$p_i = P/(a_i \times b), \quad (21)$$

где p_i — контактное давление на i -ом цикле сочленения/расчленения, Па; P — контактная сила, Н; a_i — длина площадки контактирования на i -ом цикле сочленения/расчленения, м; b — ширина площадки контактирования, м.

- Примем, что все точки площадки контактирования за цикл сочленения/расчленения проходят одинаковый путь, равный пути, который проходит центр площадки контактирования (на самом деле путь левого и правого краев площадки контактирования различается на величину длины площадки — a_i).

Линейный износ гнездового контакта за один цикл будет выглядеть так:

$$U_i = k \times s \times p_i, \quad (22)$$

где U_i — линейный износ на i -ом цикле сочленения/расчленения, м; k — коэффициент износостойкости и условий изнашивания для гнездового контакта, Па⁻¹; s — путь трения за один цикл сочленения/расчленения, м; p_i — контактное давление на i -ом цикле сочленения/расчленения, Па. Величина пути трения, который проходит розеточный контакт за цикл сочленения/расчленения, в каждом конкретном случае определяется конструкцией конкретного соединителя.

Найдем изменение размеров, вызванное увеличение площадки контактирования на i -ом цикле. Высота от площадки контактирования до центра окружности перед циклом h_i (рис. 10) равна, м:

$$h_i = \sqrt{R^2 - a_i^2}, \quad (23)$$

где R — радиус цилиндрической поверхности вилочного контакта, м.

Тогда после i -ого цикла этот размер станет, м:

$$h_{i+1} = h_i - U_i. \quad (24)$$

Соответственно изменится и длина площадки контактирования, м:

$$a_{i+1} = \sqrt{R^2 - h_{i+1}^2}. \quad (25)$$

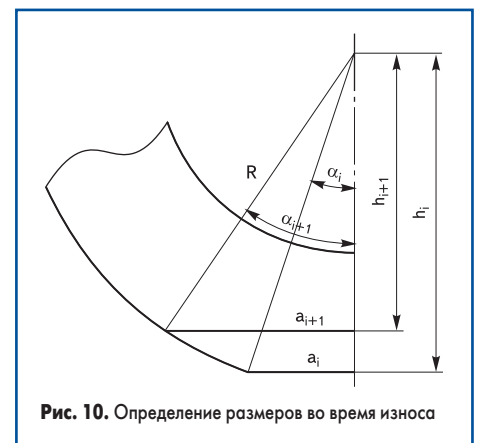


Рис. 10. Определение размеров во время износа

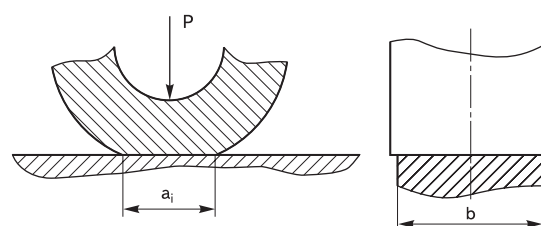


Рис. 9. Схема контактирования

Полученные результаты можно использовать для расчета величины износа на следующем цикле $i+1$ сочленения/расчленения. Данную методику можно применять для расчета ресурса (количество сочленений/расчленений до полного истирания покрытия) контактной пары. После того как величина суммарного (сумма износов на каждом цикле) износа достигнет величины толщины покрытия, резко изменяются эксплуатационные свойства контактной пары. Прежде всего, значительно увеличивается ее электрическое сопротивление, а также коррозионная активность в переходной зоне, что означает переход изделия в неисправное состояние.

Для полноты описания расчета по приведенной методике необходимо разобрать два момента. Первый — величина коэффициента k . Коэффициент зависит от материалов покрытия, качества поверхностного слоя, величины давления и других менее значимых факторов. Далее приведен метод определения этого коэффициента, предложенный авторами статьи. Второй момент — определение длины площадки контактирования для расчета первого цикла сочленения/расчленения. Мы рекомендуем использовать для этого формулу Герца — зависимость пятна контакта от контактной силы:

$$a_1 = 3,04 \sqrt{\frac{P \times R (1 - \mu^2)}{b \times E}}, \quad (26)$$

где a_1 — длина площадки контактирования перед износом, м; P — контактная сила, м; R — радиус рабочей поверхности гнездового контакта, м; μ — приведенный коэффициент Пуассона; b — ширина площадки контактирования, м; E — приведенный модуль упругости, Па. Приведенный коэффициент Пуассона вычисляется как:

$$\mu = (2\mu_{\text{гнезд}} \times \mu_{\text{нож}}) / (\mu_{\text{гнезд}} + \mu_{\text{нож}}), \quad (27)$$

где $\mu_{\text{гнезд}}$ и $\mu_{\text{нож}}$ — коэффициенты Пуассона материалов покрытия гнездового и ножевого контактов соответственно. В свою очередь приведенный модуль упругости вычисляется:

$$E = (2E_{\text{гнезд}} \times E_{\text{нож}}) / (E_{\text{гнезд}} + E_{\text{нож}}), \quad (28)$$

где $E_{\text{гнезд}}$ и $E_{\text{нож}}$ — модули упругости первого рода материалов покрытия гнездового и ножевого контактов соответственно, Па.

Исследования показывают, что отклонение даже в несколько раз от этого значения приводит к несущественным изменениям результатов (в частности, не более 1% при определении ресурса контактной пары).

Приведем методику для определения коэффициента k для гнездового контакта ножевой контактной пары. Для этого экспериментально определено среднее количество циклов сочленения/расчленения до полного износа покрытия. Тогда задача стоит в определении такого коэффициента, при котором количество циклов будет равно этой величине. Для нахождения его необходимо выполнить следующий алгоритм:

1. Задаем исходное значение коэффициента k . При этом можно воспользоваться значениями из аналогичных, проведенных ранее исследований или данными из литературных источников. Чем ближе исходное значение к действительному, тем меньше шагов и времени необходимо затратить для решения.
2. Задаем исходное значение шага приближения. Рекомендованное нами значение — 5% от исходного значения коэффициента k .
3. Считаем ресурс N до полного износа покрытия по приведенной выше методике.
4. Сравниваем полученный результат с экспериментальным значением. Если N больше, то увеличиваем значение коэффициента k на величину шага приближения и возвращаемся к пункту 3. Если N меньше, то уменьшаем значение коэффициента k на величину шага приближения и возвращаемся к пункту 3. Если значения N и экспериментальные равны, то заканчиваем поиск, значение коэффициента k определено.

Если при поиске на одном шаге приближения значение N меньше экспериментального, а на следующем больше (или наоборот, вначале меньше, а затем больше), то с заданным шагом решение найдено, и необходимо уменьшить шаг приближения для более точного решения. Рекомендуем уменьшать шаг приближения на 50%.

При решении на шаге 3 возможна ситуация, когда при выбранном значении коэффициента k полный износ покрытия достигается за очень большое количество циклов сочленения/расчленения. Для уменьшения времени решения необходимо останавливать моделирование износа при достижении экспериментального значения, не делать полный расчет, а считать, что значение N превысило экспериментальное.

В таблице приведен пример решения: необходимые параметры, экспериментальное значение ресурса и найденный коэффициент.

Полученные таким образом коэффициенты могут быть использованы для расчетов ли-

Таблица. Пример решения задачи определения коэффициента k

Радиус контактной поверхности вилочного контакта, мм	1,5
Толщина покрытия, мкм	9
Ширина рабочей части контакта, мм	1
Контактная сила, Н	0,3
Путь трения, мм	5
Начальная длина площадки контактирования, мкм	10
Количество циклов сочленения/расчленения до полного износа покрытия	1538
Вычисленный коэффициент k , Па ⁻¹	$2,133 \times 10^{-7}$

нейного износа по формулам (12, 14, 15) для расчета контактных пар аналогичной конструкции. Степень адекватности применения коэффициента в этих случаях необходимо исследовать дополнительно.

Определение износа контактной пары в результате фреттинга

Основное рабочее состояние электрического соединителя — это сочлененное. До 90–95% жизненного цикла соединителя его контакты находятся в замкнутом состоянии под определенным усилием.

Ресурс работы контактной пары электрического соединителя во многом определяется износом рабочих поверхностей контактных элементов. Износ контактов происходит в результате перемещения их относительно друг друга в процессе сочленения/расчленения, но в большей степени контакты подвергаются износу в результате развития фреттинг-коррозии, возникающей при колебательном относительном движении контактирующих поверхностей. Такое движение вызывают вибрации в электрическом соединителе. При фреттинг-коррозии значительно ухудшается качество поверхностных слоев (повышенная шероховатость, каверны, подповерхностные микротрещины), что приводит к существенному

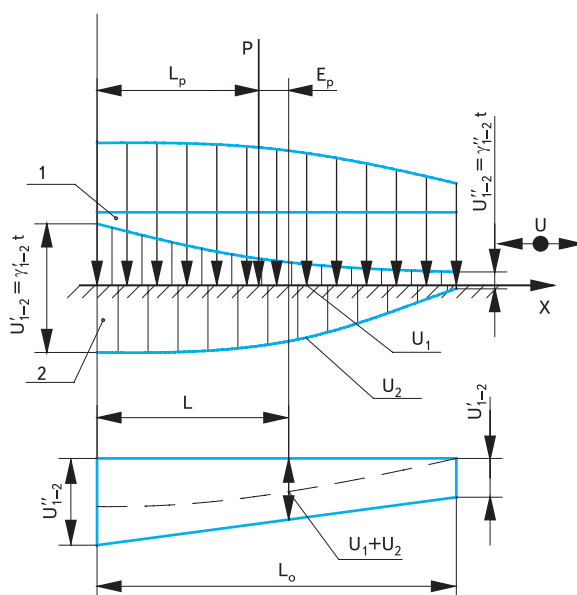


Рис. 11. Расчетная схема для определения износа контактной пары при поступательных осциллирующих движениях (фреттинг-износ)

снижению усталостной прочности покрытия и его интенсивному износу.

Специфика расчета таких сопряжений, когда можно пренебречь изменением координат по оси x для эпюра износа и давлений, заключается в возможности использовать условия касания и вследствие этого более точно рассчитать форму изношенной поверхности.

Рассмотрим расчетную схему фреттинг-износа при осциллирующих движениях в контактной паре электрического соединителя (рис. 11).

Условие касания, исходя из области взаимного внедрения контактов соединителя, выражается формулой:

$$U_1 + U_2 = U'_{1-2} \left(1 - \frac{l}{l_0}\right) + U''_{1-2} \frac{l}{l_0}, \quad (29)$$

где l_0 — расстояние между параметрами U'_{1-2} и U''_{1-2} , определяющими износ сопряжения, м.

Рассмотрим данную задачу для степенных, в отношении давления, законов изнашивания:

$$\gamma = k \times \rho^m \times v. \quad (30)$$

Для суммы скоростей изнашивания будем иметь:

- $\gamma_1 + \gamma_2 = (k_1 + k_2) \times \rho^m \times v$ — из законов изнашивания; (31)
- $\gamma_1 + \gamma_2 = \gamma'_{1-2} (1 - l/l_0) + \gamma''_{1-2} (l/l_0)$ — из условий контакта. (32)

Приравняв правые части этих уравнений, получим выражение для ρ , которое совместно с уравнениями равновесия статики даст систему уравнений:

$$\left\{ \begin{aligned} \rho^m &= \frac{1}{v \times (k_1 + k_2)} \left[\gamma'_{1-2} \left(1 - \frac{l}{l_0}\right) + \gamma''_{1-2} \frac{l}{l_0} \right], \quad (33) \\ P &= a \int_0^{l_0} \rho \times dl, \quad (34) \\ P \times l_p &= a \int_0^{l_0} \rho \times l \times dl, \quad (35) \end{aligned} \right.$$

где a — ширина контактов, м; l_p — координата приложения силы P , м.

Таким образом, получена система из трех уравнений с тремя неизвестными ρ , γ'_{1-2} и γ''_{1-2} , решение которой позволит определить необходимые параметры изношенной контактной пары.

Представленный прием иллюстрирует общий методический подход к решению задач по износу контактов в контактной паре, когда уравнений статики недостаточно для оценки эпюры давлений. Дополнительным уравнением, позволяющим определить неизвестные параметры, является условие касания контактирующих поверхностей.

Рассмотрим решение этой задачи для линейных законов изнашивания, то есть при $m = 1$. Мы отмечали ранее, что изнашивание основной массы контактных пар подчиняется этому закону.

Подставляя значение ρ из уравнения (33) в уравнение (34) и (35) и интегрируя их, получим два уравнения, из которых можно оп-

ределить значение параметров γ'_{1-2} и γ''_{1-2} изношенной контактной пары:

$$\gamma_{1-2} = \frac{P \times v (k_1 + k_2)}{a \times l_0} \times \left(1 \pm 6 \frac{\varepsilon_p}{l_0}\right), \quad (36)$$

где ε_p — эксцентриситет приложения силы P , м.

Эта формула объединяет в себе две формулы, и при знаке плюс получаем значения $\gamma_{1-2} = \gamma'_{1-2}$, а при знаке минус — $\gamma_{1-2} = \gamma''_{1-2}$. Подставив эти значения γ'_{1-2} и γ''_{1-2} в формулу (33), получим выражение для эпюры давлений, которое после преобразований будет иметь вид:

$$\rho = \rho_{cp} \left(1 + 6 \frac{\varepsilon_p}{l_0} - 12 \frac{\varepsilon_p l}{l_0^2}\right), \quad (37)$$

где $\rho_{cp} = P/(a \times l)$ — среднее давление на поверхности трения (при $\varepsilon_p = 0$ $\rho = \rho_{cp} = \text{const}$).

Следовательно, при данных законах изнашивания эпюра давлений имеет линейный характер. В общем случае это трапеция, которая при $\varepsilon_p = l_0/6$ превращается в треугольную эпюру ($\rho_{\min} = 0$). Формула (33) для эпюры давлений аналогична полученным только из уравнения статики, но с предпосылкой о линейности эпюры. В данном случае формула (33) получена при условии, когда износ пропорционален давлению. При $m \neq 1$ эпюра давлений уже не будет линейной.

Экспериментальное исследование формы изношенной поверхности контактов

Возможность аналитическим путем оценить степень износа и форму изношенной поверхности контактов контактной пары электрических соединителей по изложенной методике подтверждают многие исследования, проведенные в испытательных лабораториях и в условиях реальной эксплуатации. Измерение износа проводилось различными методами. В частности, в испытательном центре ФГУП «Карачевский завод «Электродеталь»» общий износ покрытий драгметаллами определяли весовым методом после 10% и 100% износа рабочих поверхностей контактов. Форму изношенной поверхности и характер износа определяли с помощью анализа профилограмм, полученных на разных стадиях износа.

Сравнение расчетных и экспериментальных эпюр износа показало их почти полное совпадение. Исключение составляют данные, полученные в начальный период сочленений/расчленений, когда идет процесс макроприработки контактирующих поверхностей. После этого периода процесс изнашивания стабилизируется, и форма изношенной поверхности подчиняется рассмотренным расчетным закономерностям. Значения износов, превышающие допустимые отклонения измеренной формы от теоретической, могут быть вызваны нарушением исходных условий, принятых при расчете, так как будет происходить изменение начальной эпюры давлений.

Сравнения теоретической и экспериментальной кривых износа показывают, что положение их максимумов совпадает, и расчет

дает правильное представление о форме изношенных поверхностей.

Прогнозирование износа контактной пары

Рассмотренные методы расчета на износ сопряжения позволяют еще на стадии проектирования оценить возможный ход процесса изнашивания и учесть влияние основных факторов.

Такие характеристики, как форма изношенной поверхности, эпюра давлений и изменение относительного положения контактов в контактной паре соединителя, при износе контактирующих поверхностей контактов определяют работоспособность данной пары контактов. Конструктивные особенности контактной пары, условия контактирования поверхностей, кинематические и силовые факторы, а также закономерности процесса изнашивания материалов покрытий контактов определяют характер износа контактной пары. Полученные аналитические зависимости, связывающие эти параметры, позволяют не только определить ход процесса изнашивания при определенных значениях этих факторов, но и оценить дисперсию процесса при вариации исходных параметров в определенных пределах, то есть осуществить прогнозирование износа сопряжения — контактирующих элементов.

Особую сложность при расчетах представляет определение коэффициентов износа материалов k , которые, как известно, зависят от большого числа факторов. Диапазон значений k и, соответственно, скорости изнашивания достаточно широк и при применении различных материалов покрытий в контактных парах может изменяться на несколько порядков.

Показатели износа материалов покрытия контактов, полученные экспериментально, применимы лишь для тех условий, в которых производились исследования, и даже незначительные отклонения от них при эксплуатации соединителей могут существенно повлиять на интенсивность процесса изнашивания.

Наиболее желательным было бы определение значений коэффициентов износа из закономерностей, полученных на основе физики процесса изнашивания. Однако такие расчеты износостойкости покрытий и методики их проведения еще не в полной мере разработаны, и конструктор, как правило, не имеет достоверных значений коэффициентов износа для конкретных пар трения.

В этих случаях при расчете контактных пар электрических соединителей на износ необходимо придерживаться следующей методики:

- производить сравнительные расчеты, определяя, во сколько раз повысится износостойкость данной контактной пары по отношению к прототипу или при сравнении нескольких вариантов конструкций;
- оценивать значение коэффициента износа k на основе опыта эксплуатации аналогичных контактных пар или прогнозировать возможное повышение износостойкости при применении новых материалов покрытия, зная их механические характеристики и структуры;

- производить нормирование скорости сочленения/расчленения или интенсивности изнашивания; определять такие условия эксплуатации, чтобы интенсивность изнашивания находилась в заданных пределах;
- производить испытания образцов контактных пар с различными видами покрытий, в том числе с проведением дополнительных упрочняющих операций после покрытия (оплавление, упрочняющая галтовка и т. п.), используя эти данные для расчета конкретных контактных пар.

В последнем случае при изменении условий трения и контакта на поверхностях трения контактной пары по сравнению с испытываемыми образцами возможен масштабный эффект. Например, изменение теплового влияния (лучший или худший теплоотвод) и условий попадания абразива на поверхность трения, различная деформация образца и реальных контактов контактной пары и другие факторы могут исказить полученное значение коэффициента износа k . Однако общая картина и основные факторы будут, как правило, выявлены при испытании образцов. Масштабный эффект необходимо учитывать соответствующими поправочными коэффициентами, как это делается при расчетах других характеристик и параметров.

Для развития расчетных методов оценки износа контактных пар электрических соединителей необходимо накапливать фактические данные по износостойкости типовых пар трения для различных условий эксплуатации. Расчет на износ отдельных контактных пар — это исходный момент прогнози-

рования работоспособности электрического соединителя.

Заключение

Анализ причин выхода из строя в РЭА электрических соединителей показал, что в 75 случаях из 100 он происходит по причине износа контактных пар. В связи с этим особое значение приобретает решение задачи обеспечения высокой износостойкости контактных пар как основного показателя надежности и долговечности электрических соединителей. Обеспечение этих требований немыслимо без создания современных инженерных методов расчета на износ, в которых бы учитывались физико-механические характеристики материалов контактов и их покрытий, режимы работы, внешние условия трения и конструктивные особенности фрикционного сочленения.

Представленные в статье методики расчета изнашивания контактных пар электрических соединителей, при их сочленении/расчленении и в процессе эксплуатации за счет фреттинга, в значительной степени учитывают влияние основных факторов и позволяют конструктору с достаточной точностью оценить величины износа при заданных режимах, в течение планируемого срока эксплуатации.

Необходимо дальнейшее развитие методик расчета контактных пар на износ, их конкретизация и детализация. Общие методики должны легко адаптироваться к расчетным схемам конкретных контактных пар с минимальным использованием допущений и поправочных коэффициентов. Отдельно долж-

на быть выделена проблема разработки методики определения коэффициентов износа материалов контактных пар и материалов их покрытий, как наиболее значимая.

Литература

1. Проников А. С. Контактная задача для соприкасающихся поверхностей деталей машин / Сб. XV «Трение и износ в машинах». М.: Издательство Академии наук СССР, 1962.
2. Проников А. С. Надежность машин. М.: Машиностроение, 1978.
3. Белоусов А. К. Электрические разъемные контакты в радиоэлектронной аппаратуре М.: Энергия, 1975.
4. Крагельский И. В. Трение и износ. М.: Машиностроение, 1968.
5. Крагельский И. В. Трение, изнашивание и смазка. М.: Машиностроение, 1979.
6. Крагельский И. В. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977.
7. Хольм Р. Электрические контакты. М.: Издательство иностранной литературы, 1961.
8. Проников А.С. Расчет и конструирование металлорежущих станков. М.: Высшая школа, 1967.
9. Сафонов Л., Сафонов А. Электрические прямоугольные соединители. Анализ физических процессов, происходящих в контакте // Технологии в электронной промышленности. 2007. № 6.
10. Сафонов Л., Сафонов А. Электрические прямоугольные соединители. Трение и износ в контактных парах электрических соединителей // Технологии в электронной промышленности. 2008. № 3.