

Опыт применения электрических контактов космической техники при конструировании приборов медицинского назначения

Е. В. Буслова, К. А. Гамыгин, В. Н. Столяров*,
И. Н. Столяров*

Научно-исследовательский институт электроугольных изделий,
г. Электроугли Московской области, Россия
*ЗАО «РЕНТГЕНПРОМ», г. Истра Московской области, Россия

Разработано вакуумное вращающееся контактное устройство для рентгеновской трубки. Представлены результаты ресурсных испытаний контактной пары «КП-А787В-сталь». Получены расчетные соотношения для проектирования контактных устройств.

Ключевые слова: рентгеновская трубка, вращающееся контактное устройство, электрическая щетка, приведенный износ.

При производстве рентгеновских трубок медицинского назначения с повышенной мощностью (рис. 1) с целью снижения теплового воздействия электронного пучка на поверхность мишени предусмотрено вращение ее вокруг своей оси с частотой 50—150 Гц, достаточно часто в виде электромагнитного ввода вращения в вакуумную камеру трубки. При этом для токоввода используются радиальные шарикоподшипники 26 серии, в которых твердыми смазками являются слой серебра толщиной 3 мкм, нанесенный способом электролитического осаждения на поверхность сепаратора, и дисульфид молибдена, нанесенный на поверхность колец. Свойства пластичных металлов, равно как и смазывающие свойства дисульфида молибдена, достаточно хорошо освещены в отечественной литературе [1, 2].

Поскольку рабочая температура подшипников достигает 400 °С, радиальные зазоры для них в соответствии с конструкторской документацией составляют 40 мкм. Условия работы тел качения при давлении в приборе 10^{-4} — 10^{-3} Па можно назвать экстремальными. Токи, проходящие через тела качения, могут достигать 1 А. Даже в тщательно отбалансированных роторах неизбежно происходит искрение, возникают обусловленные им дефекты подшипников в виде микросварки, прижогов и нарушения геометрии тел качения. При этом вызванные возникновением микроразрядов в момент отрыва поверхности шариков от беговой дорожки электромагнитные помехи распространяются по электронным цепям аппарата, приводя к сбоям в работе оборудования. Каждый подобный сбой влечет за собой необходимость повторения диагностической процедуры. В результате дозовая нагрузка на пациента увеличивается, что противоречит принципам минимизации рисков ущерба для здоровья населения при лучевой диагностике [3].



Рис. 1. Рентгеновская трубка аппарата «Проскан-2000».

При разработке нового узла вращения ставилась задача обеспечения надежного электрического контакта в цепи анод—токовая клемма во всех режимах эксплуатации прибора. Наличие вращающегося с частотой 50 Гц анода сопряжено с возникновением виброперемещений в отдельных частях конструкции. Величины виброскоростей, измеренных в 50 однотипных рентгеновских трубках, лежат в диапазоне 0,15—0,75 мм/с. Исходя из установленных величин

вибрации и распределения силовых нагрузок, разработчиками было принято решение об оснащении прибора дополнительным вращающимся контактным устройством (ВКУ), расположенным по оси прибора и включающим соосно расположенные неподвижный и вращающийся цилиндрические контакты, образующие контактную пару. Условия работы контактной пары представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Условия эксплуатации контактной пары ВКУ

| | |
|---------------------------------|-----------------------|
| Напряжение, кВ | 40—125 |
| Сила тока, А | 0,002—1 |
| Температура, °С | ≤100 |
| Давление, Па | 10^{-4} — 10^{-3} |
| Частота вращения, об/мин | 0—3000 |
| Установленный ресурс, включения | 20 000 |

При разработке конструкции ВКУ учитывали следующие требования к его работе.

1. Система должна быть подпружинена и создавать натяг, обеспечивающий гарантированный электрический контакт в цепи анод—катод.
2. Вращающееся контактное устройство не должно создавать дополнительного момента трения, уменьшающего выбег ротора более чем на 50% от выбега в его отсутствие.
3. Подвижный и неподвижный контакты не должны свариваться и схватываться в условиях вакуума и повышенной температуры.
4. Вращающееся контактное устройство не должно служить источником дополнительного газовыделения в отпаянном объеме прибора.

Неподвижный контакт был выполнен из конструкционной стали, рабочая (плоская, торцевая) поверхность контакта токарно обработана до $R_a = 3,6$. Подвижный контакт, имеющий сферическую полированную рабочую поверхность с диаметром сферы 3 мм, изготавливали из следующих материалов стали 40Х13 (вариант № 1), посеребренной меди марки М1 (вариант № 2) и материала, разработанного для контакта-щеткой марки КП-А787В для ВКУ спутников дистанционного зондирования Земли [4], который напаивался на медный контактодержатель (вариант № 3, рис. 2).

Диаметр цилиндрической и сферической частей щеток составляет 3 мм, высота — также 3 мм (типоразмер СП 0330 по ГОСТ 3884). Для пайки к контактодержателю щетки со стороны нерабочей (плоской) поверхности имеют серебряный подслоя толщиной 0,25 мм. Физические свойства материала щеток, представляющего собой порошковую композицию на основе системы серебро—дисульфид молибдена, приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2. Физические свойства материала щеток КП-А787В

| | |
|--|---------|
| Плотность, г/см ³ | 7,4—8,1 |
| Твердость $HV_{5/15}$ | 31—52 |
| Удельное электрическое сопротивление, мОм·м, не более | 0,050 |
| Переходное электрическое сопротивление, мОм*, не более | 100 |
| Коэффициент трения*, не более | 0,35 |

*Измерено в паре с контртелом из твердого серебра и при усилии контактного нажатия 0,4Н.

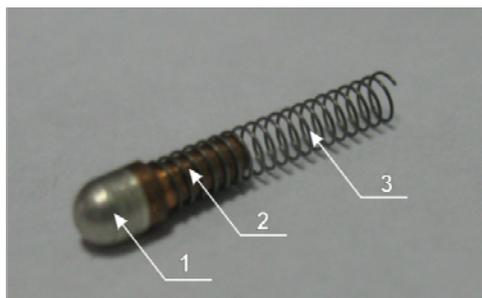


Рис. 2. Вращающийся контактный узел рентгеновской трубки: 1 — контакт-щетка; 2 — контактодержатель; 3 — пружина-токоподвод.

Были проведены отборочные испытания подвижного контакта различных вариантов исполнения в составе рентгеновских трубок при частоте вращения 3000 об/мин. Усилие

контактного нажатия варьировалось от 0,4 до 2 Н. Определяли время выбега ротора, уровень шума и виброскорости, наличие прерываний тока при подаче высокого напряжения. Результаты испытаний представлены на рис. 3 и в табл. 3.

Результаты испытаний показали, что контакты, изготовленные по варианту № 1 (сталь 40Х13 с полированным скругленным торцом), обладают высоким уровнем шума (до 78 дБ); в остальной части требований они продемонстрировали удовлетворительные характеристики. Контакты по варианту № 2 (медь марки М1 с посеребренным торцом) не выдержали испытаний в результате излома в поперечном сечении после 2 ч работы. Контакты по варианту № 3 (щетка КП-А787В, напаянная на медное основание) показали удовлетворительные характеристики при уровне шума до 70 дБ, что соответствует техническим требованиям на изделие. Усилие поджатия, соответствующее минимально приемлемому значению выбега ротора (5 мин), составило 0,6 Н. При этом контакты всех трех вариантов обеспечили надежный электрический контакт в анодной цепи во всем диапазоне работы прибора.

На следующем этапе проводили ускоренные ресурсные испытания образцов варианта № 3. После $8 \cdot 10^6$ оборотов вращения с частотой 3000 об/мин изделия вскрывали и подвергали контролю состояния контактирующих поверхностей. Диаметр пятна контактирования на щетках составил около 1 мм, глубина выработки щетки — 0,09 мм. По полученным данным определяли приведенный массовый износ I_m материала щетки [5] при работе в рассматриваемых условиях, по которому можно судить о ресурсных возможностях щетки данного типоразмера, что можно использовать при проектировании ВКУ подобного типа [5]. Для выполнения этой задачи нами были выведены необходимые расчетные соотношения.

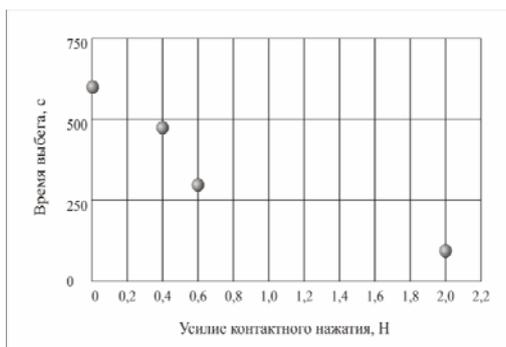


Рис. 3. Зависимость времени выбега от усилия контактного нажатия.

Т а б л и ц а 3. Результаты отборочных испытаний подвижного контакта ВКУ различных вариантов исполнения

| Вариант | Усилие контактного нажатия, Н | Время выбега, с | Максимально измеренное значение виброскорости, мм/с | Уровень шума, дБ | Наличие прерываний тока |
|---------|-------------------------------|-----------------|---|------------------|-------------------------|
| 1 | 2 | 180 | 0,210 | 78 | Нет |
| 2 | 2 | 94 | 0,167 | 68 | Нет |
| 3 | 2 | 186 | 0,650 | 70 | Нет |
| 3 | 0,6 | 300 | 0,159 | 67 | Нет |
| 3 | 0,4 | 480 | 0,186 | 68 | Нет |

На рис. 4 приведен эскиз контакта-щеткой типа СП (сфера—плоскость). Глубина выработки (убыль высоты) h и радиус контактной площадки r связаны соотношением

$$h = R - \sqrt{R^2 - r^2}, \quad (1)$$

где R — радиус сферы.

В качестве характеристики пути трения примем средний радиус контактной площадки $\frac{r}{2}$. При совершении щеткой dN оборотов путь трения составит

$$dL = 2\pi dN = \pi r_{(N)} \cdot dN. \quad (2)$$

При этом величина массового износа

$$d_m = D \cdot dV = D\pi r^2 dh, \quad (3)$$

где D — плотность материала; dV, dh — объем и высота элемента массы d_m .

Тогда приведенный массовый износ I_m можно определить, разделив (3) на (2):

$$I_m = \frac{dM}{dL} = \frac{Drdh}{dN} = \text{Const.} \quad (4)$$

Из соотношения (1) получим

$$dh = \frac{rdr}{\sqrt{R^2 - r^2}}, \quad (5)$$

Подставив (5) в (4) и разделив переменные, имеем

$$\frac{r^2 dr}{\sqrt{R^2 - r^2}} = \frac{I_m}{D} dN \quad (6)$$

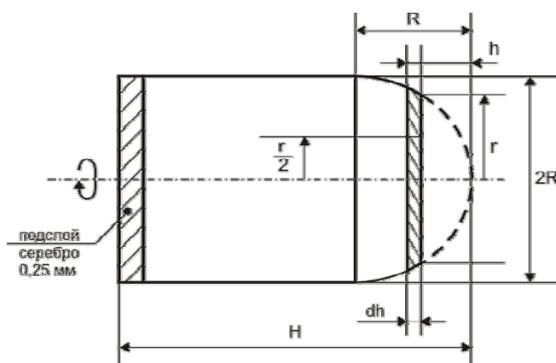


Рис. 4. Электрический контакт-щетка КП-А787В СП 0330 ($R = 1,5$ мм; $H = 3$ мм; масса — 0,14 г; h — глубина выработки (износа) контакта; r — радиус контактной площадки в процессе работы; $\frac{r}{2}$ — средний радиус контактной дорожки.

Проинтегрировав уравнение (6), при начальных условиях $N = 0$, $r = 0$ получим

$$I_m \frac{\left(R^2 \cdot \arcsin \frac{r}{R} - r \sqrt{R^2 - r^2} \right) \cdot D}{2 \cdot N} \quad (7)$$

При $r = 0,5$ мм, $R = 1,5$ мм, $D = 7,7$ г/см³ и $N = 8 \cdot 10^6$ получим приведенный массовый износ материала щетки $I_m = 3 \cdot 10^{-5}$ г/км.

Пользуясь полученными соотношениями и зная величину I_m , можно определить ресурсные возможности щетки данного типоразмера либо решить обратную задачу — по заданному ресурсу (число оборотов) определить требуемую геометрию щетки. Так, при рабочей частоте вращения 3000 об/мин и заданном ресурсе 20 000 включений ($200 \cdot 10^6$ оборотов) ожидаемый износ щеток составит 0,8 мм, а при частоте вращения 9000 об/мин — 2,0 мм.

Выводы

Приведены результаты разработки вакуумного вращающегося контактного устройства для рентгеновской трубки с частотой вращения анода 3000 об/мин и установленным ресурсом 20 000 включений. Проведены ускоренные ресурсные испытания контактной пары “КП-А787В (вращающаяся щетка)—сталь (контртело)”. Получены расчетные соотношения, связывающие геометрические характеристики износа щетки, приведенный массовый износ материала щетки и количество выполненных оборотов. По результатам ресурсных испытаний определен приведенный массовый износ материала щетки (порошковая композиция на основе системы серебро—дисульфид молибдена) — $3 \cdot 10^{-5}$ г на 1 км пути трения.

1. Гусев Н. А., Козелкин В. В., Гуров А. А. Материалы для узлов сухого трения, работающих в вакууме: (Справ.) / Под общ. ред. В. В. Козелкина. — М.: Машиностроение, 1991. — 192 с.
2. Ваништейн В. В., Трахновская Г. И. Сухие смазки и самосмазывающиеся материалы. — М.: Машиностроение, 1968. — 180 с.
3. Рентгеновские диагностические аппараты. В 2 т. Т. 1 / Под ред. Н. Н. Блинова, Б. И. Леонова. — М.: ВНИИИМТ, НПО “Экран”, 2001. — 220 с.
4. Буслова Е. В., Гамыгин К. А., Прохоров Ю. Н. Влияние окружающей среды на характеристики электрических контактных пар для вращающихся контактных устройств спутников дистанционного зондирования Земли // Электрические контакты и электроды. — К.: Ин-т пробл. материаловедения НАН Украины, 2010. — С. 250—255.
5. Затовский В. Г. Расчетные соотношения для определения интенсивности изнашивания скользящих контактов // Там же, 2008. — С. 134—137.