

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН ОТКАЗА ДАТЧИКА УГЛА МАРШЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ

Аннотация.

Актуальность и цели. Объектом исследования являются датчики угла маршевых двигателей ракет-носителей. Цель работы – определение причин отказа датчиков при проведении периодических испытаний.

Материалы и методы. Исследование проводилось методами растровой электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа, позволившими проанализировать микроструктуру контактной пары датчика и определить химический состав продуктов износа.

Результаты. Были получены данные по износу контактной пары датчика, вызванного попаданием абразивных частиц на рабочую контактную поверхность. На основе полученных данных были сделаны практические рекомендации с целью предотвращения отказов датчика, вызванных повышенным износом его резистивного элемента.

Выводы. В процессе исследования были выявлены причины отказов датчиков, вызванных повышенным износом резистивных элементов из-за попадания абразивных частиц на рабочую контактную поверхность.

Ключевые слова: потенциометр, резистивный элемент, подвижный контакт, контактная пара, износ, продукты износа.

A. I. Tsygankov

INVESTIGATING CAUSES OF ANGLE SENSOR FAILURES IN SUSTAINER ENGINES OF LAUNCH-VEHICLES

Abstract.

Background. The research object is angle sensors sustainer engines of launch-vehicles. The aim of the work is to determine the cause of sensor failures during periodic testing.

Materials and methods. The study was conducted by scanning electron microscopy and X-ray microanalysis that allowed to analyze the microstructure of a contact pairs of a sensor and to determine the chemical composition of wear debris.

Results. The author obtained data on sensor's contact pair wear, caused by appearance of abrasive particles on the working contact surface. Based on the data the researcher made practical recommendations to prevent failures of the sensor, caused by excessive wear and tear of its resistive element.

Conclusions. The study identified the causes of failures of sensors due to increased wear of resistive elements, caused ingress of abrasive particles on the working contact surface.

Key words: potentiometer, resistive element, movable contact, contact pair, wear, wear products.

Введение

В ракетно-космической технике широко используются датчики угла. Из-за жестких условий эксплуатации в качестве датчиков угла на ракетах-носителях, как правило, используются резистивные проволочные потенцио-

метры. Потенциометр является регулируемым делителем электрического напряжения, представляющим собой резистор с подвижным отводным контактом – движком, при этом коэффициент деления потенциометра является функцией угла поворота движка относительно резистивного элемента [1]. Предметом исследования данной статьи является потенциометр П-75, используемый в качестве датчика угла поворота маршевых двигателей ракет-носителей «Союз» и «Протон». С целью подтверждения параметров надежности в соответствии с техническими условиями¹ потенциометры П-75 проходят периодические испытания и в случае отказа в процессе испытания хотя бы одного потенциометра испытания останавливаются до выяснения и устранения причин возникновения отказа.

Основная часть

Несмотря на то, что потенциометры П-75 (рис. 1) изготавливаются с 1966 г. и прошли не один десяток периодических испытаний, иногда случаются их отказы. Один из таких отказов произошел в 2015 г. После 15 тысяч циклов работы произошло резкое уменьшение сопротивления потенциометра. Для выяснения причины отказа потенциометров на предприятии ОАО «НИИЭМП» при помощи растрового электронного микроскопа (РЭМ) [2], снабженного системой рентгеноспектрального микроанализа, было проведено исследование резистивного элемента и подвижного контакта как отказавшего потенциометра, так и потенциометров из той же выборки, прошедших испытание.



Рис. 1. Изображение потенциометра П-75

Первичный осмотр резистивного элемента отказавшего потенциометра подтвердил, что на контактных дорожках действительно имеются продукты износа, удерживаемые смазкой в межвитковом пространстве (рис. 2).

Была выдвинута гипотеза, что причиной уменьшения сопротивления может быть наличие на контактной дорожке продуктов износа контактной пары, которые замыкают витки между собой [3]. Была проведена тщательная промывка резистивного элемента в спирте при помощи кисти с жесткой щет-

¹ ТУ ОДС.534.080 «Потенциометр П-75».

тиной. Однако очистка контактной дорожки от продуктов износа и смазки не вернула сопротивление потенциометра в заданные пределы.

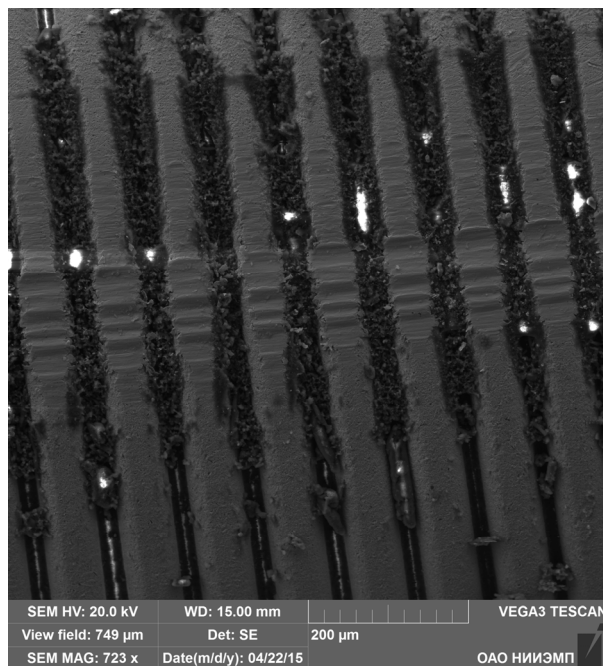


Рис. 2. Изображение резистивного элемента со смазкой, содержащей частицы износа, полученное при помощи РЭМ

После этого был проведен повторный осмотр резистивного элемента при помощи РЭМ, который показал, что резистивная проволока имеет значительные деформации в месте соприкосновения с подвижным контактом. В результате чего возникают наплывы материала проволоки в межвитковом пространстве, похожие на заусенцы (рис. 3), образующиеся при механической обработке металлов. Эти заусенцы удерживают свободные частицы износа и препятствуют их удалению. Таким образом, между витками проволоки образуются переемы, что и приводит к уменьшению сопротивления резистивного элемента. В процессе очистки удалить эти заусенцы при помощи кисти не получается, так как они имеют значительную жесткость.

Изучение резистивных элементов потенциометров из той же выборки, прошедших испытание, не выявило такого характера износа проволоки, как у бракованного образца.

Одной из возможных причин такого износа резистивной проволоки могло стать превышение давления контактной пружины. Однако эта величина строго оговорена требованиями технических условий и тщательно контролировалась в процессе сборки.

Второй наиболее вероятной причиной износа резистивной проволоки мог быть некачественный материал контактной пружины. При нарушении химического состава контактной пружины она могла иметь излишнюю твердость, что, в свою очередь, привело бы к увеличению износа резистивной проволоки. Для проверки данной гипотезы был проведен рентгеноспектральный микроанализ контактных пружин, который не выявил отклонений в хи-

мическом составе марки материала, из которого были изготовлены контактные пружины. Однако в процессе проведения микроанализа были найдены посторонние включения в материал контактных пружин (рис. 4).

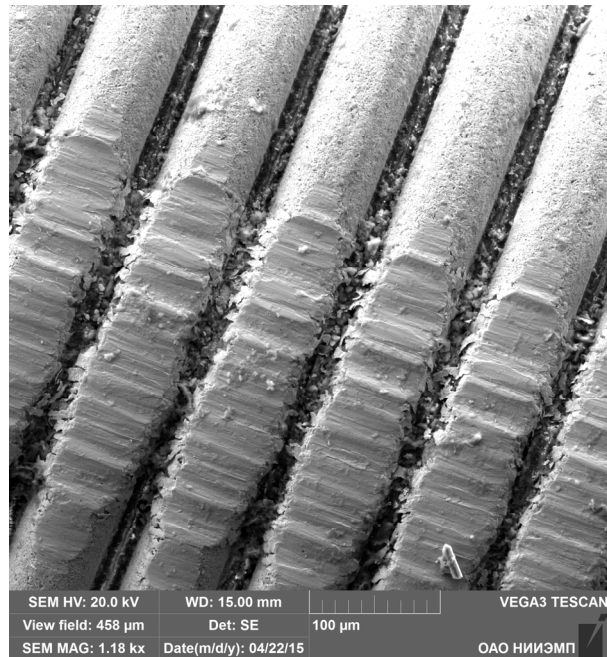


Рис. 3. Изображение резистивного элемента после очистки, полученное при помощи РЭМ

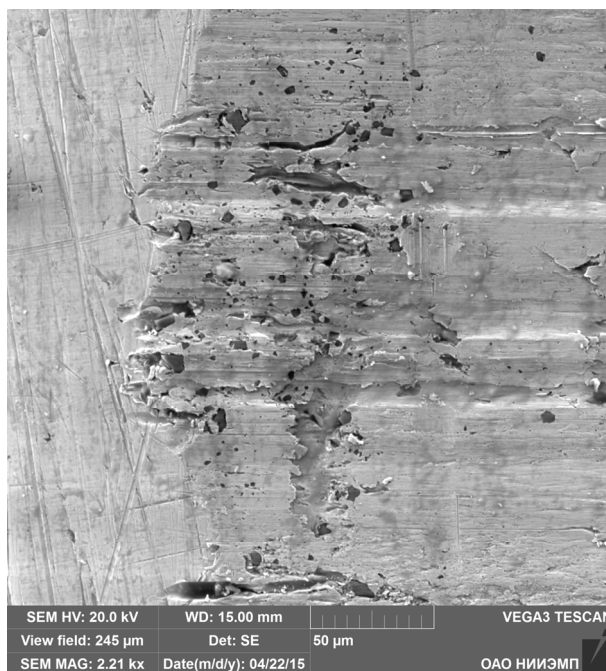


Рис. 4. Изображение контактной пружины с посторонними включениями, полученное при помощи РЭМ

Анализ химического состава включений в материале пружин показал (рис. 5), что это кристаллы оксида алюминия (корунд), которые применяются для зачистки проволоки от изоляции в процессе изготовления.

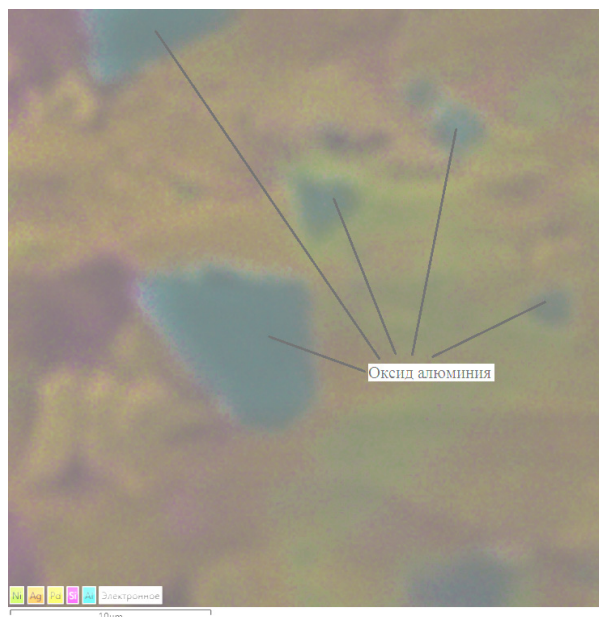


Рис. 5. Карта распределения химических элементов в контактной пружине, полученная при помощи РЭМ

Несмотря на то, что в процессе изготовления резистивной проволоки предусмотрены процедуры его очистки, частицы оксида алюминия не только остались на его поверхности, но и проникли в матрицу основного материала контактной пружины. Таким образом, контактная пружина была снабжена абразивными частицами, которые вызвали повышенный износ резистивной проволоки. При этом от резистивной проволоки стали отделяться частицы, покрытые слоем окислов, так как условия для этого благоприятны: происходит сильная деформация частиц в процессе трения, что приводит к их повышенному окислению (фрикционное окисление) [4]. Любая частица металла, полученная за счет его износа, может стать абразивной, особенно если она затвердела за счет наклепа или окислилась. А из-за того что частицы износа обладают большей твердостью, чем основной металл, они, выступая в качестве дополнительного абразивного материала, увеличивают износ контактной пружины и проволоки еще больше. При этом применяемая смазка удерживает и накапливает все большее количество абразивных частиц, мешая им упасть с поверхности контактной дорожки, что также увеличивает износ контактной пары.

Заключение

Проведенное исследование позволило выявить причины отказа потенциометра П-75. С целью предотвращения повторения подобных отказов предприятию-изготовителю потенциометров П-75 были даны следующие рекомендации:

1. Следует проводить более тщательную очистку резистивного элемента от посторонних частиц. Для этих целей рекомендуется применять много-этапную промывку резистивного элемента с использованием различных типов моечных машин (ультразвуковые, струйные) с последующей продувкой сжатым обеспыленным воздухом. После операций очистки следует проводить контроль каждого резистивного элемента при помощи микроскопа при большом увеличении.

2. Следует подобрать оптимальные размеры формы контактной пружины, а также определить минимальное допустимое давление контактной пружины на резистивную проволоку, что может снизить износ контактной пары потенциометра при сохранении его надежной работы в течение всего срока службы.

3. Следует изучить возможность применения способов зачистки резистивной проволоки от изоляции без применения абразивных порошков. В качестве альтернативных способов снятия изоляции может подойти химическая, ультразвуковая или лазерная зачистка.

4. Следует рассмотреть возможность неприменения смазки для контактной пары, так как это обеспечит более легкое удаление продуктов износа с контактной дорожки потенциометра. Относительно малый ресурс работы потенциометра, всего 15 тысяч циклов, позволяет это сделать.

5. Следует рассмотреть возможность исключения операции зачистки резистивной проволоки от изоляции из технологического процесса изготовления потенциометра. Это возможно сделать при помощи замены проволоки с изоляцией на проволоку без изоляции, однако при этом придется строго выдерживать шаг намотки с последующим контролем качества раскладки проволоки по каркасу.

Список литературы

1. **Белевцев, А. Т.** Потенциометры / А. Т. Белевцев. – М. : Машиностроение, 1968. – 328 с.
2. **Недорезов, В. Г.** Особенности контроля микроструктур методами электронной микроскопии / В. Г. Недорезов, А. И. Цыганков // Надежность и качество : тр. Междунар. симпозиума / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2014. – Т. 2. – С.
3. **Кузнецов, Е. А.** О причинах устойчивого нарушения контакта потенциометров / Е. А. Кузнецов // Авиационная промышленность. – 1965. – № 2.
4. **Крагельский, И. В.** Трение и износ / И. В. Крагельский. – М. : Машгиз, 1962. – 384 с.

References

1. Belevtsev A. T. *Potentsiometry* [Potentiometers]. Moscow: Mashinostroenie, 1968, 328 p.
2. Nedorezov V. G., Tsygankov A. I. *Nadezhnost' i kachestvo: tr. Mezhdunar. simpoziuma* [Reliability and quality: proceedings of the International symposium]. Penza: Izd-vo PGU, 2014, vol. 2, S.
3. Kuznetsov E. A. *Aviatsionnaya promyshlennost'* [Aircraft industry]. 1965, no. 2.
4. Kragel'skiy I. V. *Trenie i iznos* [Friction and wear]. Moscow: Mashgiz. 1962, 384 p.

Цыганков Алексей Игоревич

аспирант, Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: cygankv-aleksejj@rambler.ru

Tsygankov Aleksey Igorevich

Postgraduate student, Penza State
University (40 Krasnaya street, Penza,
Russia)

УДК 629.7.05

Цыганков, А. И.

Исследование причин отказа датчика угла маршевых двигателей ракет-носителей / А. И. Цыганков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2015. – № 4 (36). – С. 89–95.