

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ, ПРОИСХОДЯЩИХ НА ПОВЕРХНОСТИ КОНТАКТ-ДЕТАЛЕЙ ГЕРКОНА КЭМ-2, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ ЖЕЛЕЗОНИКЕЛЕВОГО СПЛАВА БЕЗ КОНТАКТНОГО ПОКРЫТИЯ, В ПРОЦЕССЕ КОММУТАЦИИ ТОКА

---

*С.М. Карabanов, д.т.н., В.И. Ясевич  
390027, Россия, г. Рязань, ул. Новая, 51В, ОАО «РЗМКП»*

*Приведены методика и результаты экспериментальных исследований процессов, происходящих при коммутации тока герконом с контакт-деталью без контактного покрытия. Установлено, что в процессе коммутации тока в диапазоне от 100 до 250 мА поверхность контактов подвергается воздействию мостиковой электроэрозии. Установлено, что геркон КЭМ-2 с контакт-деталью без контактного покрытия может использоваться для коммутации тока до 250 мА, при значении коммутируемого напряжения 30 В, в цепи с активной нагрузкой.*

*Methods and results of the experimental investigations of processes occurring during switching the current by reed contacts without contact coating. It has been found that during current switching in the range from 100 up to 250 mA, the surface of contacts is subjected to bridge electrolytic erosion. It was determined that the reed switch КЭМ-2 having contacts without contact coating can be used for the current switching up to 250 mA, when switching voltage in the circuit with resistive load is 30 V.*

## Введение

В условиях современного рынка весьма существенным фактором является цена конечного продукта, которая зависит от стоимости геркона, являющегося его основным компонентом. Как один из путей снижения стоимости геркона, существует возможность использования герконов без специального контактного покрытия. Стоимость операций, неотъемлемо связанных с нанесением контактного покрытия, достигает 40-60 % от полной себестоимости геркона. Безусловно, использование сплавов пермаллового типа как материала контактной группы может ухудшить электрические параметры геркона и привести к снижению его ресурса. При этом возникает вопрос о принципиальной возможности и границах области применения таких герконов. Приведенные исследования посвящены изучению деградации контактных поверхностей контакт-деталей, изготовленных из сплава 52-НВИ. Полученные данные проанализированы с точки зрения физической природы возникновения дефектов, прогнозирования возможности использования с определением параметрических границ применения геркона типа КЭМ-2 без контактного покрытия.

## 1. Методика исследования

Исходя из теоретических и экспериментальных данных о процессах электроэрозии контактов, возникает необходимость в изучении данных процессов и в особенности их последствий для контактов, изготовленных из сплава 52-НВИ без контактного покрытия. Необходимо выяснить, как длительный режим коммутации нагрузки влияет на поверхность таких контактов. При этом целесообразно выбрать режим коммутации, близкий к реальным условиям применения герконов, например, в магнитоуправляемых датчиках.

Для исследования выбран геркон КЭМ-2. Диапазон коммутируемого тока выбран также исходя из собирательных требований к герконам для известных конструкций датчиков от 50 до 500 мА. Напряжение коммутации 30 В выбрано как предельное рабочее напряжение для диапазона номинальных значений напряжения от 5 до 24 В в большинстве случаев

применения датчиков. Метод исследования заключается в том, что испытуемые герконы подвергаются испытаниям в виде многократной, до  $10^6$ , коммутации активной нагрузки. При этом управление герконом осуществляется с помощью обмотки, напряжение на которой изменяется от 0 до  $U_{\text{макс}}$  по гармоническому закону с периодом 60 мс.  $U_{\text{макс}} = 1,5 U_{\text{ср}}$ , где  $U_{\text{ср}}$  – напряжение, при котором срабатывает испытуемый геркон. Для каждого геркона  $U_{\text{ср}}$  определялось отдельно. Таким образом, реализовано управление герконом с помощью изменяющегося по гармоническому закону магнитного поля, период изменения которого существенно больше значения времени замыкания, дребезга и размыкания для данного типа геркона. Напряжение на катушку подавалось от генератора напряжения звуковой частоты. Напряжение на геркон подавалось от стабилизированного источника напряжения через токоограничивающий резистор, с помощью которого устанавливался ток в замкнутой цепи.

Схема устройства изображена на рис. 1.

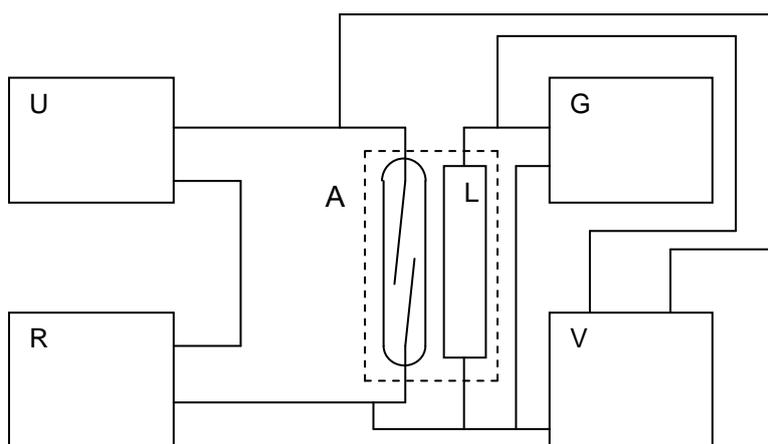


Рис. 1. Схема устройства для проведения испытаний: А – испытуемый геркон, L – управляющая обмотка СЯ 028.648, G – генератор синусоидального напряжения ГЗ-36А, V – осциллограф двухлучевой С2-91, R – токоограничивающий резистор МЛТ-2, U – источник постоянного стабилизированного напряжения Б5-71/1М

Напряжение источника питания устанавливалось равным  $30\text{В} \pm 0,5\text{В}$ . Для достижения требуемого значения тока, коммутируемого герконом, подбирался токоограничивающий резистор  $R = 30/I_{\text{исп}}$ . Значение тока индицировалось на амперметре источника. При этом вместо геркона подключалась короткозамкнутая цепь. Далее амплитуда напряжения на выходе усилителя звукового генератора плавно увеличивалась до значения, при котором начиналось срабатывание геркона. Момент срабатывания и значение напряжения на обмотке фиксировались и измерялись с помощью осциллографа. Затем амплитуда напряжения увеличивалась в 1,5 раза и фиксировалась на все время испытаний. Полное время испытаний составляло 9 часов, количество полных циклов коммутации – приблизительно  $10^6$ , с учетом того что за период происходит два замыкания и два размыкания. Осциллограф использовался для периодического контроля работы контактов на предмет обнаружения отсутствия размыкания или превышения контактного сопротивления более 2 Ом, это значение в 10 раз меньше, чем необходимо для устойчивой работы большинства формирователей сигнала, используемых при работе с герконами. Осциллограммы напряжений представлены на рис. 2.

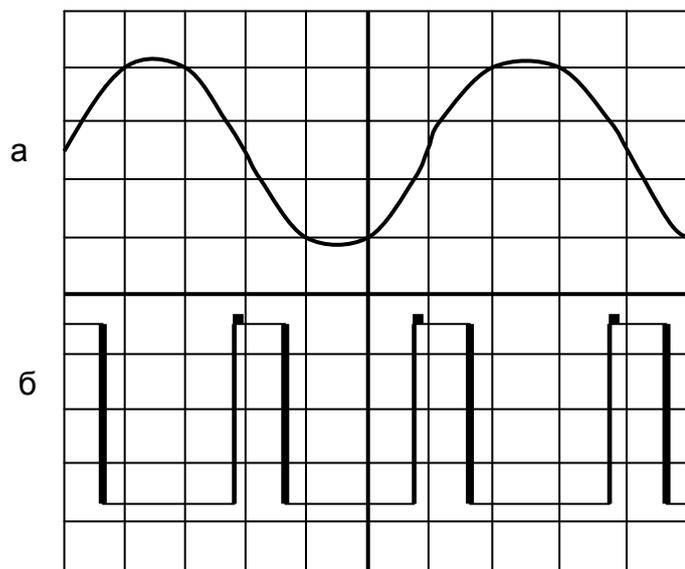


Рис. 2. Осциллограммы напряжений на управляющей обмотке (а) и на герконе (б), горизонтальная развертка 10 мс, вертикальная развертка луча (а) – 2В, луча (б) – 10В

После испытаний каждый геркон подвергался анализу. Контакт-детали извлекались из колбы и помечались отдельно для каждого геркона, соответственно, контакт-анод и контакт-катод. После этого контакты исследовались с помощью электронно-зондового микроанализатора JXA-50A «JEOL» на предмет обнаружения следов электроэрозии. Для контакт-деталей, на которых были обнаружены следы электроэрозии, проводилось дополнительное исследование с помощью металлографического микроскопа МИМ-10, с целью измерения площади участка поверхности контакта, поврежденного электроэрозией.

## 2. Подготовка исследуемых герконов

Для исследования была изготовлена партия герконов КЭМ-2 в количестве 1000 штук по сокращенному технологическому циклу. В процессе изготовления были опущены процессы нанесения гальванических покрытий, вместо этого после магнитного отжига контакт-детали подверглись электрохимической полировке, после чего были заварены в герконы. Материал контакт-детали – сплав 52-НВИ. Магнитный отжиг по технологии МАГПАЗ. Заварка осуществлялась на автомате МРК-20. При заварке выставлена МДС срабатывания в диапазоне 45-55 А.

## 3. Испытания

Указанные герконы были разделены на 10 партий по 100 штук, каждая партия была подвергнута испытаниям при одном значении коммутируемого тока от 50 мА до 500 мА с шагом 50 мА. Все герконы, прошедшие испытания, были промаркированы по значению коммутируемого тока, контакт-детали герконов были промаркированы по полярности подключения. Время, в течение которого производились испытания, было выбрано одинаковым для всех значений коммутируемого тока и составляло по 9 часов, что соответствует приблизительно  $10^6$  полных циклов коммутации. В процессе испытаний, периодически, (1 раз в 30 минут в течение 1 минуты), с помощью осциллографа, производилось измерение напряжения на контактах, по значению которого определялось наличие размыкания контактов и значение контактного сопротивления для замкнутого состояния контактов. Если в процессе контроля хотя бы один раз зафиксировано отсутствие размыкания или превышение значения контактного сопротивления более 2 Ом, испытания прекращались, и отказавший геркон маркировался по типу нарушения работоспособности,

значению тока, на котором проводились испытания, и времени от начала до момента прекращения испытаний. Герконы из партий, для которых не зафиксировано нарушений коммутации, подвергались исследованию поверхности контактов на предмет обнаружения повреждений. Герконы из партий, для которых зафиксированы нарушения коммутации, дальнейшему исследованию не подвергались. Далее из каждой партии, прошедшей испытания без нарушений коммутации, было отобрано случайным образом по 5 герконов для исследования рабочей поверхности контакт-деталей. Для каждой контакт-детали, на рабочей поверхности которой обнаружены повреждения, было проведено измерение площади поврежденного участка. Среднее арифметическое значение площади повреждения для 10 контакт-деталей каждой партии помещены в таблицу с указанием, на каком токе проводились испытания.

#### 4. Результаты исследования

На рис. 3-11 представлены фотографии рабочих поверхностей анодных и катодных контакт-деталей, полученные с помощью электронно-зондового микроанализатора. Стрелкой указаны зоны повреждения поверхности контактов. Для значения тока 50 мА повреждение поверхности не обнаружено.

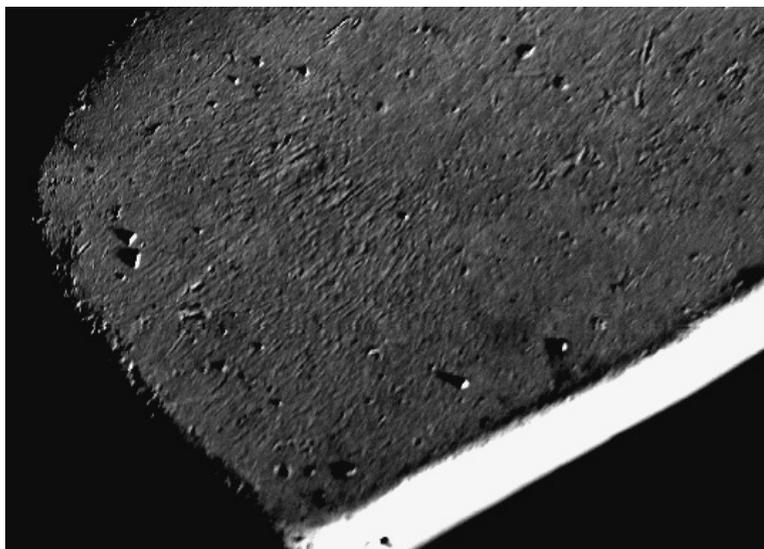


Рис. 3. Рабочая поверхность катода при токе 50 мА (увеличение 1100)

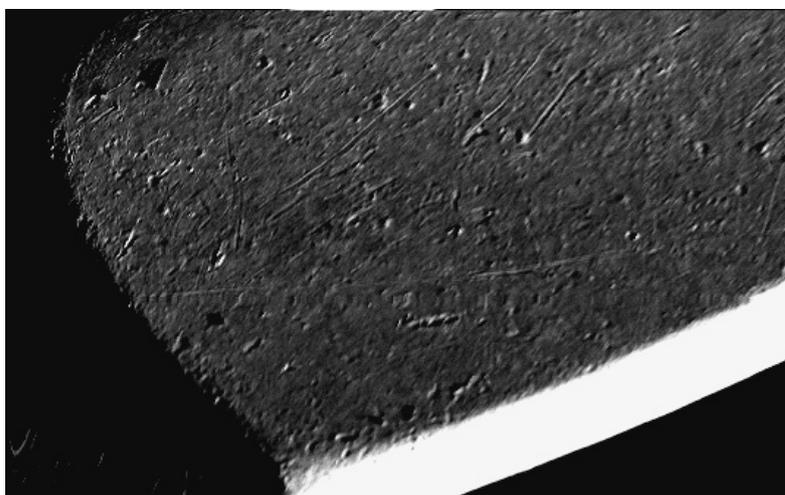


Рис. 4. Рабочая поверхность анода при токе 50 мА (увеличение 1100)

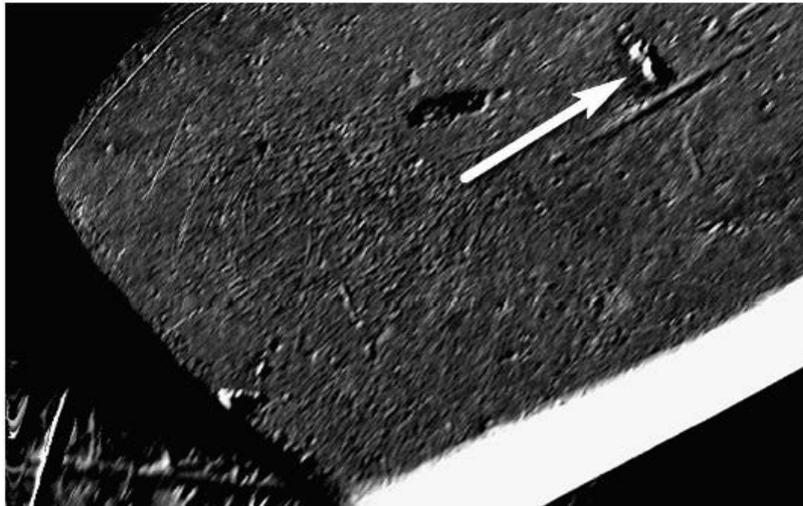


Рис. 5. Рабочая поверхность катода при токе 100 мА (увеличение 1100)

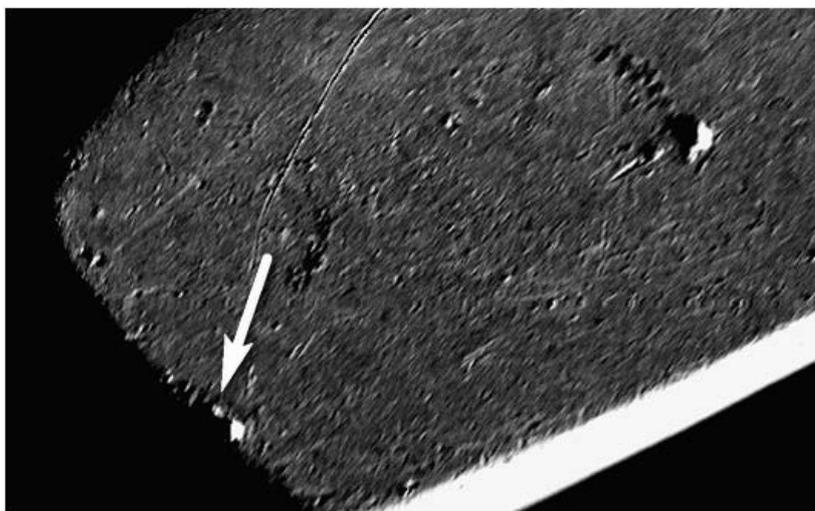


Рис. 6. Рабочая поверхность анода при токе 100 мА (увеличение 1100)

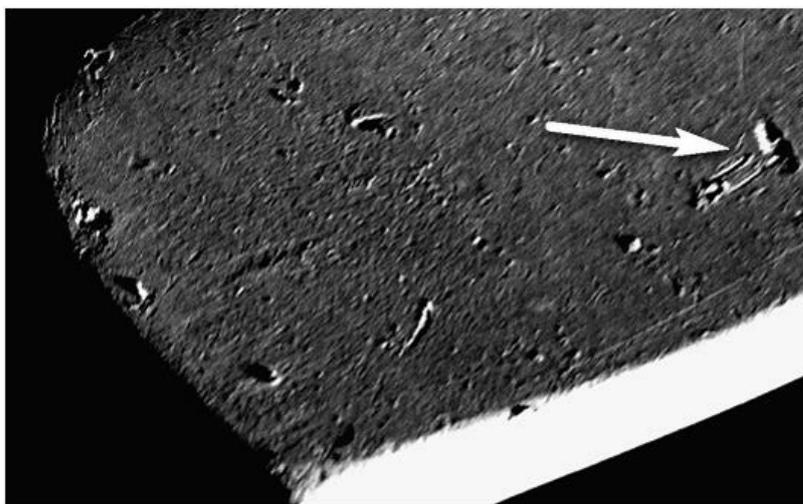


Рис. 7. Рабочая поверхность катода при токе 150 мА (увеличение 1100)

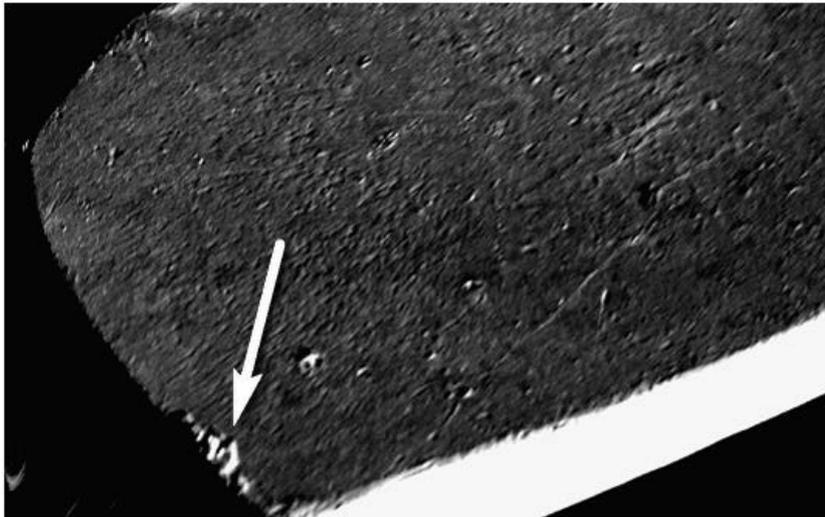


Рис. 8. Рабочая поверхность анода при токе 150 мА (увеличение 1100)

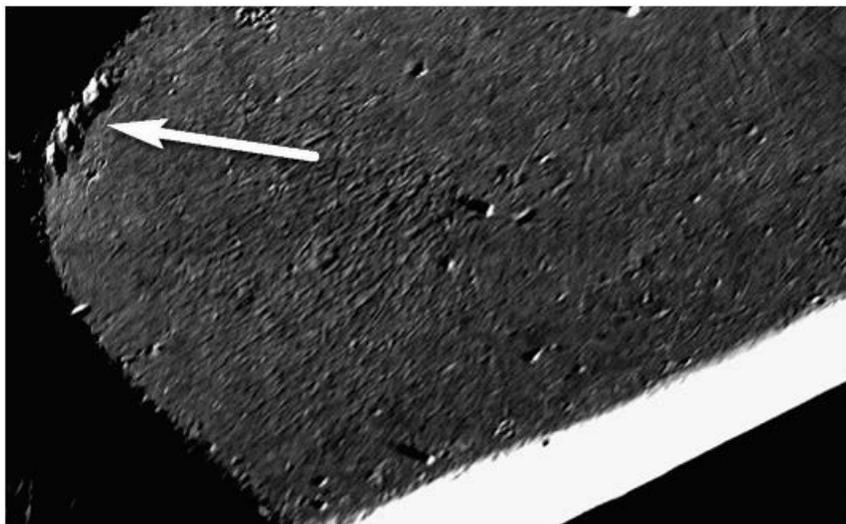


Рис. 9. Рабочая поверхность катода при токе 200 мА (увеличение 1100)

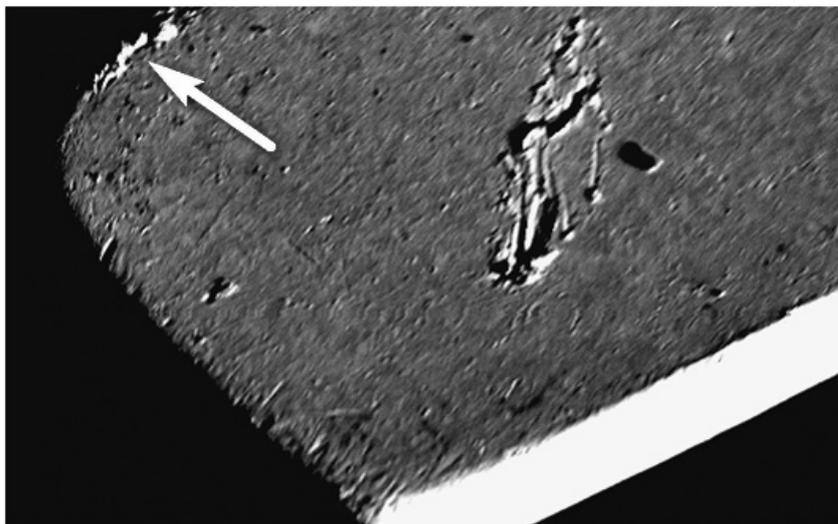


Рис. 10. Рабочая поверхность анода при токе 200 мА (увеличение 1100)

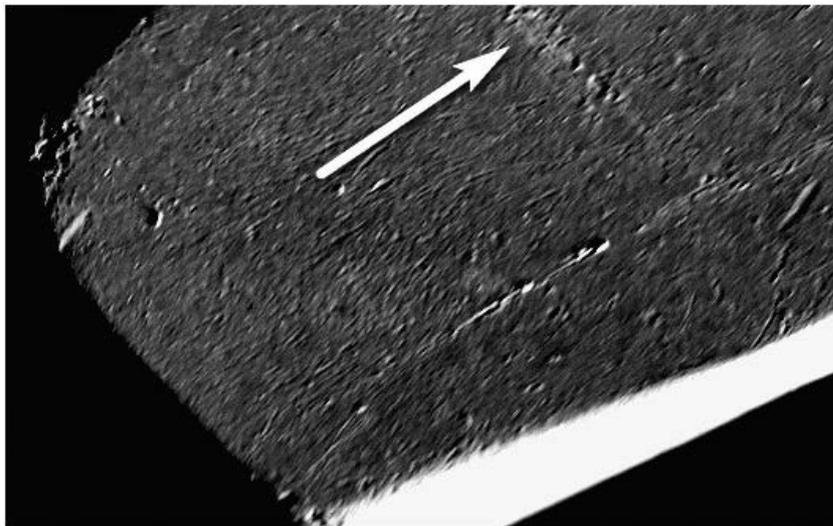


Рис. 11. Рабочая поверхность анода при токе 250 мА (увеличение 1100)

Как видно из рисунков, на рабочих поверхностях катодных и анодных контакт-деталей герконов, прошедших испытания при значениях тока в диапазоне от 100 до 250 мА, можно различить следы повреждений контактной поверхности, вызванные явлениями контактной электроэрозии. На рис. 12 и 13, при увеличении 2700, заметен характер повреждений, свойственный мостиковому полярному типу электроэрозии. Заметны острия на поверхности катода и гладкие наплывы на поверхности анода. При этом повреждений, характерных для воздействия длинной дуги или плазменной эрозии тлеющего разряда, не обнаружено.

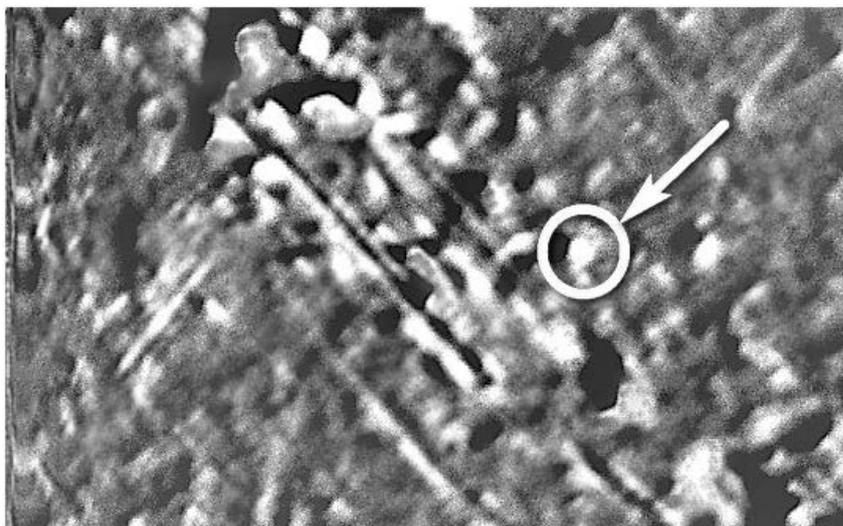


Рис. 12. Зона повреждения рабочей поверхности анода при токе 250 мА (увеличение 2700)

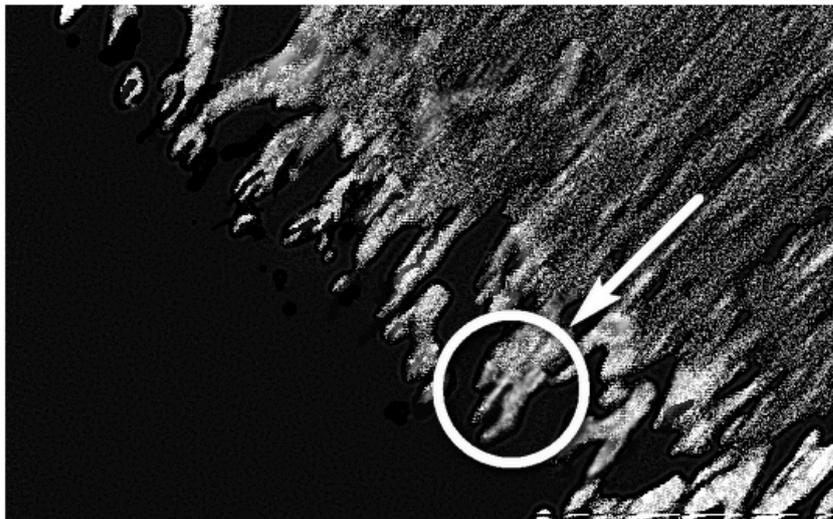


Рис. 13. Зона повреждения рабочей поверхности катода при токе 250 мА  
(увеличение 2700)

Нарушений коммутации в виде превышения значения контактного сопротивления более 2 Ом ни в одной из партий не установлено. Данные о среднем значении площади поверхности контактов, поврежденной в процессе испытаний, и среднем значении плотности тока в зоне контактирования, как отношения значения коммутируемого тока к среднему значению площади поврежденного участка, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Данные о среднем значении площади поверхности контактов, поврежденной в процессе испытаний, и среднем значении плотности тока в зоне контактирования

<b>Значение коммутируемого тока, мА</b>	<b>Среднее значение площади поверхности контакта, поврежденной электроэрозией, мм<sup>2</sup></b>	<b>Среднее значение плотности тока в зоне контактирования, А/мм<sup>2</sup></b>
100	0,006	15,15
150	0,011	13,63
200	0,015	13,07
250	0,034	7,35
300	0,039	7,53

Данные о площади поврежденной поверхности при значении коммутируемого тока 300 мА приведены дополнительно, так как для данного значения тока регистрировались нарушения коммутации. Зависимости средних значений площади поверхности контактов, поврежденной электроэрозией, и плотности тока от значения коммутируемого тока представлены на рис. 14 и 15.

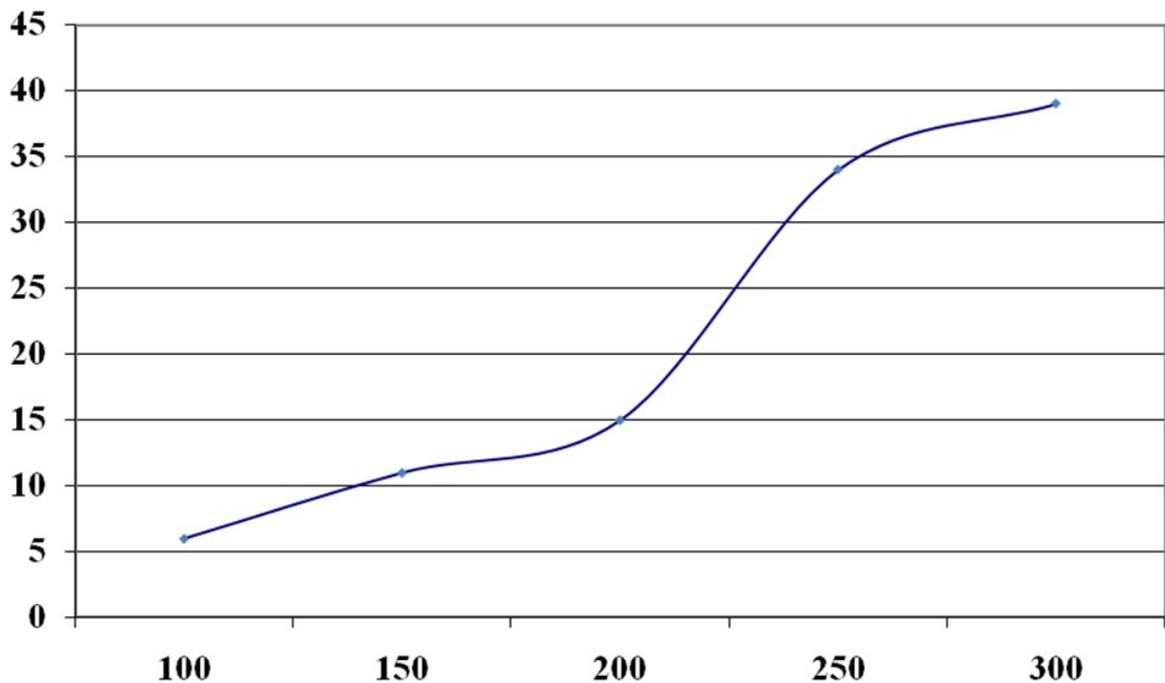


Рис. 14. Зависимость среднего, для 10 контакт-деталей, значения площади поверхности контакта, поврежденной электроэрозией, от значения коммутируемого тока, где по оси X – значение коммутируемого тока, мА, по оси Y – среднее значение площади поверхности, поврежденной электроэрозией, мм<sup>2</sup> × 10<sup>-3</sup>

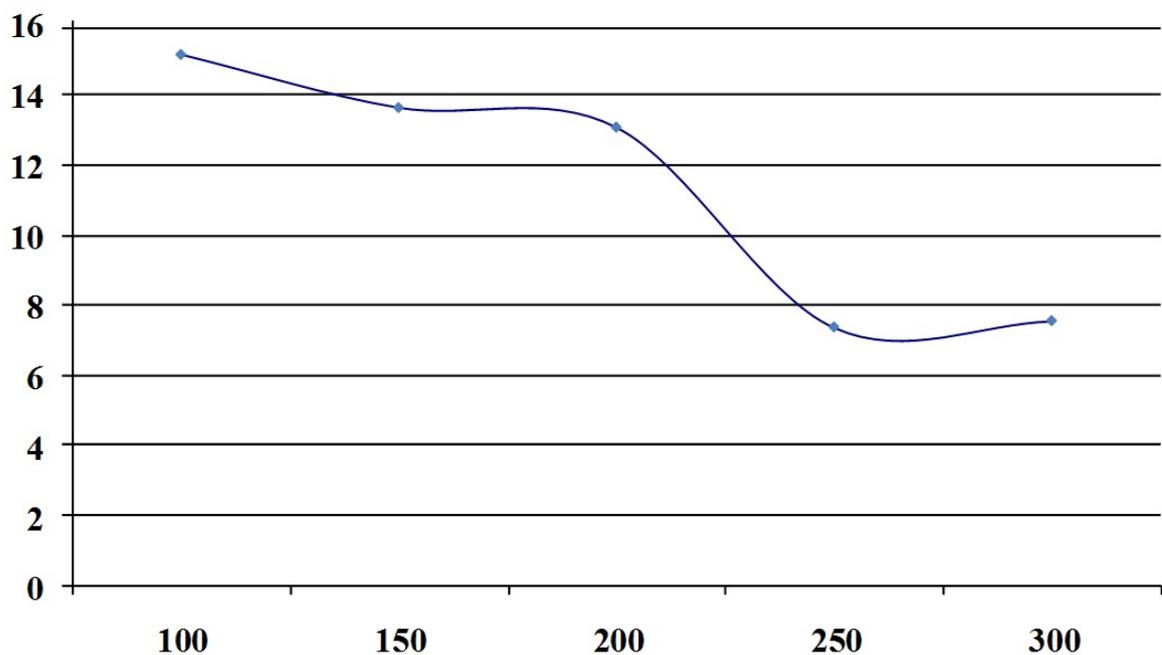


Рис. 15. Зависимость среднего, для 10 контакт-деталей, значения плотности тока от значения коммутируемого тока, где по оси X – значение коммутируемого тока, мА, по оси Y – среднее значение плотности тока, А/мм<sup>2</sup>

Полученные данные свидетельствуют о том, что при значении коммутируемого тока 50 мА следов электроэрозионных процессов на поверхности контакт-деталей не обнаружено. При значении коммутируемого тока 100, 150, 200 и 250 мА следы электроэрозионных процессов обнаружены, причем установлена зависимость площади поврежденного электроэрозией участка контакта от значения коммутируемого тока. Можно предположить,

что для геркона КЭМ-2 с контакт-детальями, изготовленными из сплава 52Н-ВИ, без контактного покрытия, существует значение коммутлируемого тока, ниже которого электроэрозионные процессы в используемом режиме коммутации отсутствуют. В рассматриваемом случае, это значение находится в диапазоне от 50 до 100 мА.

Для партий герконов, проходивших испытания при значениях коммутлируемого тока 300, 350, 400, 450 и 500 мА, регистрировались нарушения коммутации в виде временного или окончательного неразмыкания цепи контактов при отсутствии управляющего магнитного поля. На рис. 16 представлена гистограмма распределения количества герконов из партий по 100 штук, для каждого значения коммутлируемого тока, для которых зафиксировано нарушение коммутации в виде неразмыкания.

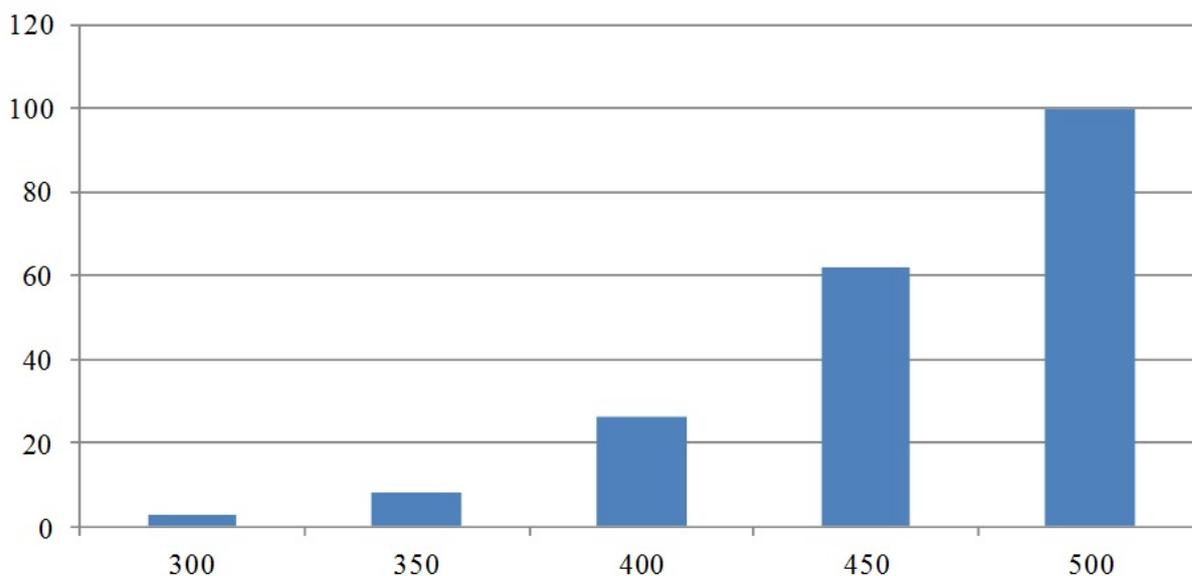


Рис. 16. Гистограмма распределения количества герконов, для которых зафиксированы факты неразмыкания из партий по 100 штук, для каждого значения коммутлируемого тока, где по оси X – коммутлируемый ток, мА, по оси Y – количество герконов из партии, для которых зафиксировано неразмыкание, шт.

На рис. 17 представлено семейство зависимостей количества нарушений коммутации, в виде неразмыкания, от полного времени испытаний, для различных значений коммутлируемого тока.

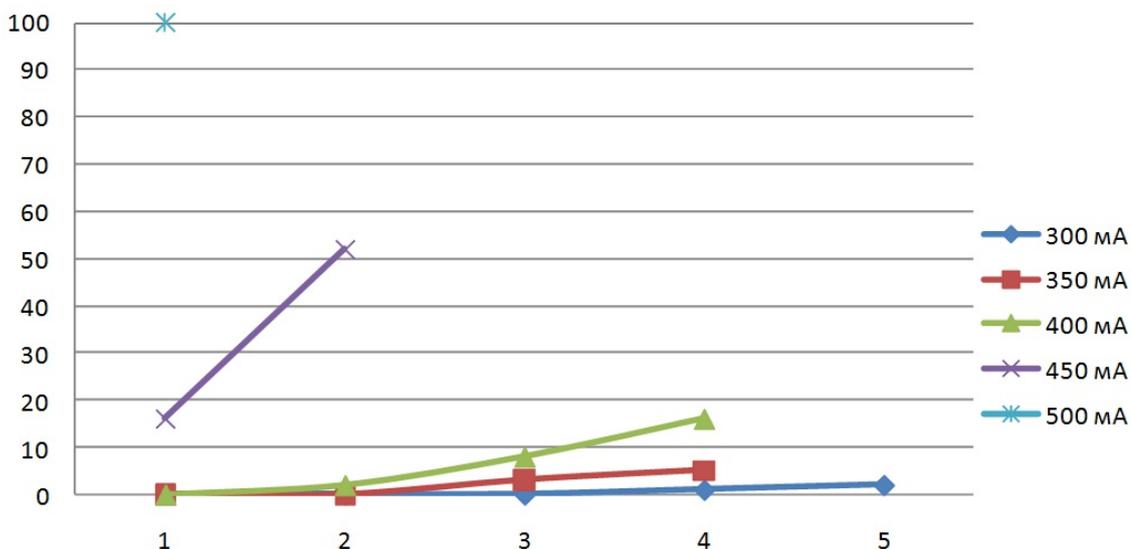


Рис. 17. Зависимости количества герконов из партий по 100 штук, для которых зафиксировано нарушение коммутации в виде неразмыкания, от полного времени испытаний, для различных значений коммутируемого тока, где по оси X – полное время испытаний в часах, по оси Y – количество отказов в штуках

Можно предположить, что причиной неразмыкания контактов является механическое соединение, а именно сваривание. Причиной образования достаточно прочной сваренной области может быть наличие жидких областей материала контактов в зоне контактирования на момент их соединения. При этом после соединения и остывания образуется область сваренного материала контактов, которая может либо разрушиться, либо нет, под действием упругих сил, растягивающих контакты. Области жидкого материала, предположительно, остаются после разрушения мостика, образовавшегося в процессе предыдущего замыкания контактов (например, в процессе дребезга контактов при замыкании). Вероятность образования прочного сварного соединения контактов определяется объемом жидкого материала в зоне контактирования, который, в свою очередь, зависит от значения коммутируемого тока и температуры контакт-детали. Зависимости, представленные на рис. 17, показывают увеличение количества зафиксированных неразмыканий при увеличении значения коммутируемого тока и количества циклов коммутации.

### Выводы

На основании полученных результатов можно сделать вывод о принципиальной возможности использования геркона КЭМ-2 с контакт-деталью, изготовленными из сплава 52Н-ВИ, без контактного покрытия, для коммутации тока в цепи с активной нагрузкой в диапазоне от 50 до 250 мА при напряжении 30 В.

Использование геркона для коммутации токов большего значения в выбранном режиме нежелательно из-за высокой вероятности появления нарушений коммутации в виде неразмыкания контактов. Установлена зависимость количества нарушений коммутации в используемом режиме от значения коммутируемого тока и полного времени испытаний.

В диапазоне значений коммутируемого тока от 50 до 100 мА существует значение тока, ниже которого коммутация тока в используемом режиме происходит без образования жидкого мостика и без воздействия электроэрозионных процессов на поверхность контактов.

Для определения более точных рекомендаций по использованию геркона КЭМ-2, с контакт-деталью, изготовленными из железоникелевого сплава, без контактного покрытия, необходимо проведение дополнительных исследований, направленных на изучение динамики контактного сопротивления таких герконов в различных режимах коммутации.