

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ ГЕРМЕТИЗИРОВАННЫХ МАГНИТОУПРАВЛЯЕМЫХ КОНТАКТОВ

И.А. Зельцер, С.М. Карabanов, д.т.н.,
Р.М. Майзельс, доктор электротехники, В.А. Саблин
390027, ул. Новая 51В, г. Рязань, Россия, ОАО «РЗМКП»

Рассмотрены методы обработки герконов как с гальваническим покрытием, так и без него. Показано, что герконы без специальных покрытий после ионно-плазменной обработки не уступают герконам с гальваническими покрытиями из благородных металлов.

Methods for processing of reed switches both having electroplated coating, and without it are examined. It was demonstrated that the reed switches without special coatings after ion-plasma treatment are not inferior to the reed switches electroplated with noble metals.

1. Введение

Геркон (магнитоуправляемый контакт – МК) является прибором для коммутации токов, обладающим рядом уникальных особенностей. Это приводит к постоянному расширению областей его использования. Удешевление производства без существенных потерь в характеристиках выдвигает ряд требований к процессу производства, таких как отказ от использования «мокрых» технологий (для нанесения покрытий), уменьшение или полный отказ от использования дорогих материалов.

На данный момент покрытия используются для придания контактирующим поверхностям повышенной электропроводности, устойчивости к коррозии и эрозии.

Герконы, изготовленные из контакт-деталей без специальных покрытий, изначально не обладают некоторыми важными характеристиками, присущими герконам с гальваническими покрытиями из драгметаллов. Более того, в процессе заварки геркона поверхности контактов загрязняются продуктами теплового распада разного рода органических и не только соединений, а также стекла баллона. Результатом этого является повышенное сопротивление контактов, которое представляет собой основную причину брака. Особо сильное влияние тепловое воздействие заварки оказывает на контакты, не защищенные специальными покрытиями.

Поэтому возникла необходимость в методах, позволяющих уменьшить количество брака за счет специальной обработки уже готовых герконов.

Возникло два направления [1 - 4], заключающихся в использовании локального пробоя (или нескольких) или газового разряда.

В работе [1] очистка поверхности производится пропусканием тока высокой частоты через разомкнутые контакты геркона, авторы [2] эту задачу решали в процессе срабатывания геркона пропусканием через его контакты импульсов тока. При этом обработка поверхности идет последовательностями дуговых электрических разрядов. Недостатки этих двух методов проанализированы в работе [3]. Для очистки и тренировки контактирующих поверхностей геркона авторы [3, 4] предлагают использовать низковольтные импульсные разряды, образующиеся на малых межэлектродных промежутках в процессе вынужденных [3] и автоматических [4] колебаний контактных пружин. При этом наибольший интерес представляет процесс [4], при котором происходит автоматическое колебание контактных пружин и модификация их поверхности.

В случае обработки герконов с контактирующими поверхностями без специальных покрытий одной очистки недостаточно. Поверхностям контактов требуется придать также антикоррозионные и антиэрозионные свойства.

Одним из наиболее перспективных и современных методов модификации поверхности является воздействие низкотемпературной плазмы (НТП), которое позволяет изменить свойства поверхностей в широких пределах, что значительно расширяет области использования изделий с обработанной поверхностью.

В настоящее время плазменные методы широко применяются в производстве большого числа разнообразных изделий, например, для высокоанизотропного травления отдельных слоев наноструктур, низкотемпературного осаждения диэлектриков, удаления фоторезиста, очистки поверхности пластин от органических загрязнений и атомов тяжелых металлов, планаризации, ионной имплантации, нанесения покрытий.

При изготовлении мощных герконов для нанесения тугоплавких покрытий из молибдена и вольфрама на контакт-детали успешно применяются методы вакуумного плазменно-дугового напыления.

Наибольший интерес представляет то, что в результате воздействия «холодной» высокочастотной плазмы пониженного давления на металлы и твердые сплавы на поверхности можно сформировать нанослои с заданными свойствами.

Установлено [5], что «в результате воздействия «холодной» ВЧ плазмы пониженного давления на металлы и твердые сплавы атомы плазмообразующего газа проникают в поверхностные слои материала на глубину до 30 нм. При добавлении в аргоновую ВЧ плазму реакционно-способных газов (N_2 , O_2 , C_3H_8) у поверхности образуются нанофазные системы из оксидов, нитридов и карбидов элементов, входящих в состав материала. В результате формирования поверхностных нанослоев повышается коррозионная стойкость, микротвердость, износостойкость изделий из этих материалов».

Таким образом, в плазме возможно протекание ряда физико-химических процессов, природа которых в значительной степени зависит как от состава газовой фазы разряда, его типа и режима, так и от структуры и состава обрабатываемого металла, формирующих требуемые параметры обрабатываемой поверхности. Задача состоит в том, чтобы обеспечить такое сочетание вышеперечисленных характеристик, при котором в приповерхностной области пермалловых контактов герконов сформируются коррозионно- и эрозионноустойчивые наноразмерные слои с высокой электропроводностью.

Следовательно, применяя специальные методы как при изготовлении контакт-деталей, так и к готовым герконам, имеется возможность приблизить параметры приборов, изготовленных без использования специальных покрытий из драгоценных металлов, к характеристикам приборов с такими покрытиями, а иногда и превзойти их.

Целью данной работы является изучение возможности использования плазмы в промышленных масштабах для очистки от загрязнений и придания антикоррозионных и антиэрозионных свойств рабочим поверхностям контактных пружин, изготовленных из пермаллоя и не защищенных от коррозии и эрозии специальными покрытиями. Решение поставленной задачи напрямую связано с необходимостью проведения анализа известных методов обработки контактных покрытий, изучением характерных особенностей низковольтных и высоковольтных импульсных разрядов на малых межэлектродных промежутках и исследованием влияния этих разрядов на свойства герконов с контактами из пермаллоя, изготовленных без гальванопокрытий.

2. Методы обработки специальных контактных покрытий

2.1 Высокочастотная плазма

В [1] для очистки контактирующих поверхностей после заварки контактных пружин (КП) в баллон, наполненный нейтральным, инертным или восстановительным газом, через МК, находящийся в разомкнутом состоянии, пропускают ВЧ ток с частотой от нескольких десятков килогерц до десятков МГц в зависимости от типа контактов и поставленной технологической задачи. Продолжительность обработки может быть разной и составлять от нескольких десятых секунд до нескольких секунд.

Образующийся в межконтактном промежутке сгусток плазмы способствует очистке контактирующих поверхностей, сглаживанию микроострий и удалению посторонних частиц.

Загрязнения, удаляемые с контактирующих поверхностей под действием высокой температуры, будут переходить в газообразные вещества или конденсироваться на холодных поверхностях внутри полости баллона. Обратный переход с холодных стенок на контактирующие поверхности менее вероятен.

С учетом этих факторов и было проведено опробование способа. В одном из вариантов в качестве источника ВЧ энергии применялся генератор с частотой колебаний 40 МГц, мощностью 100 Вт и напряжением до 500 В.

При подключении МК к колебательному контуру (рис. 1) через каждый геркон проходит разный ВЧ ток. Это связано с небольшим различием в составе газового наполнения и давления в баллонах. В свою очередь, это приводит к смещению резонансной частоты колебательного контура генератора и к еще большему различию в «порциях» энергии, получаемой разными герконами.

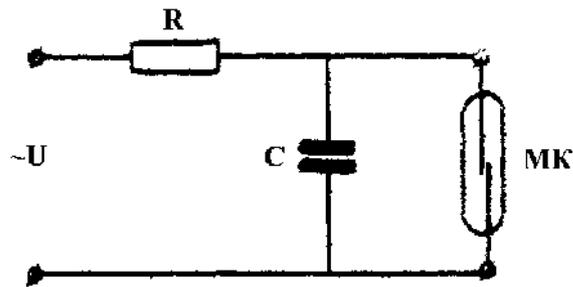


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема генератора для термической обработки МК

Для решения этой проблемы была предложена схема (рис. 2), позволяющая точно дозировать энергию, проходящую через геркон. Переменное напряжение промышленной частоты величиной 2000 В от трансформатора Тр подается на последовательно соединенные сопротивления R3 и конденсатор С. Параллельно конденсатору присоединены клеммы для подключения обрабатываемого геркона.

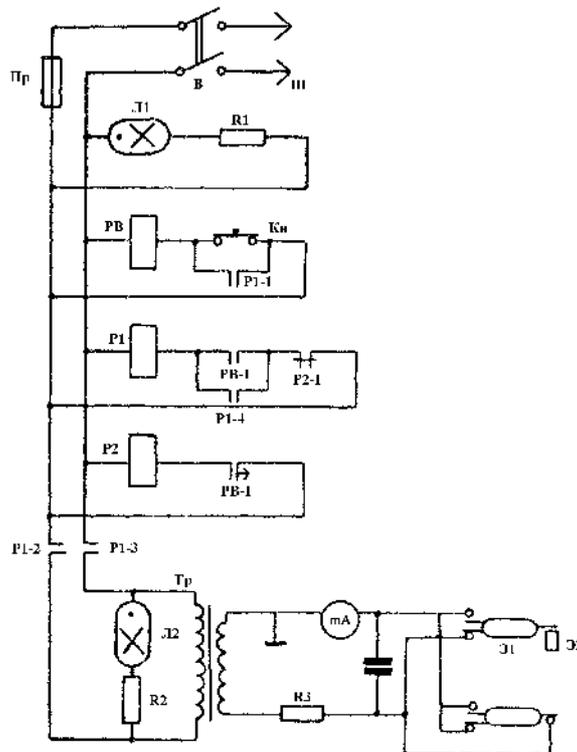


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема устройства для обработки МК в электрическом разряде

Напряжение на МК подается через реле времени Рв и систему реле Р1 и Р2. Время термической обработки регулируется от 0,5 до 10 секунд.

На опытном образце устройства была проведена термическая обработка контактирующих поверхностей МК типа КЭМ-3. Нагрев рабочих концов КП до 600-700 °С осуществлялся пропусканием ВЧ импульсов тока через нормально разомкнутые лепестки в течение 3 секунд.

Методика эксперимента следующая. Партия приборов КЭМ-3 в количестве 150 шт. была поделена поровну на две части, из которых одна часть сразу после заварки и измерения параметров была подвергнута термической обработке контактирующих поверхностей. Больше никаких различий в технологии изготовления не было.

На рис. 3, 4 показано распределение приборов опытной и параллельной партий по сопротивлению до и после термической обработки.

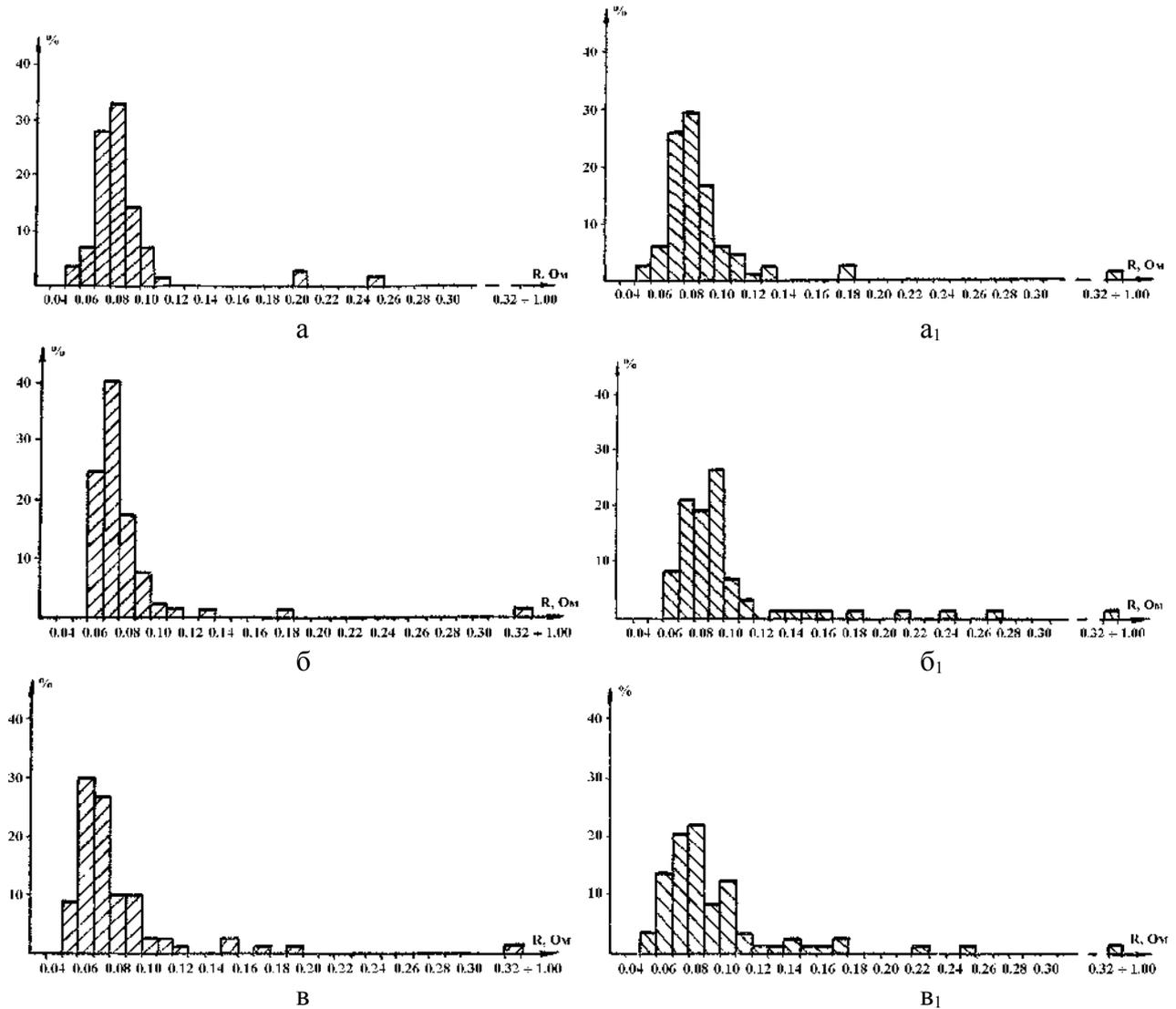


Рис. 3. Распределение МК типа КЭМ-3 по сопротивлению нормально замкнутой пары контактов в опытной и параллельной партиях: а, а₁ – исходные значения в опытной и параллельной партиях; б, б₁ – через 7 дней (б – после обработки); в, в₁ – через 40 дней (в – после обработки)

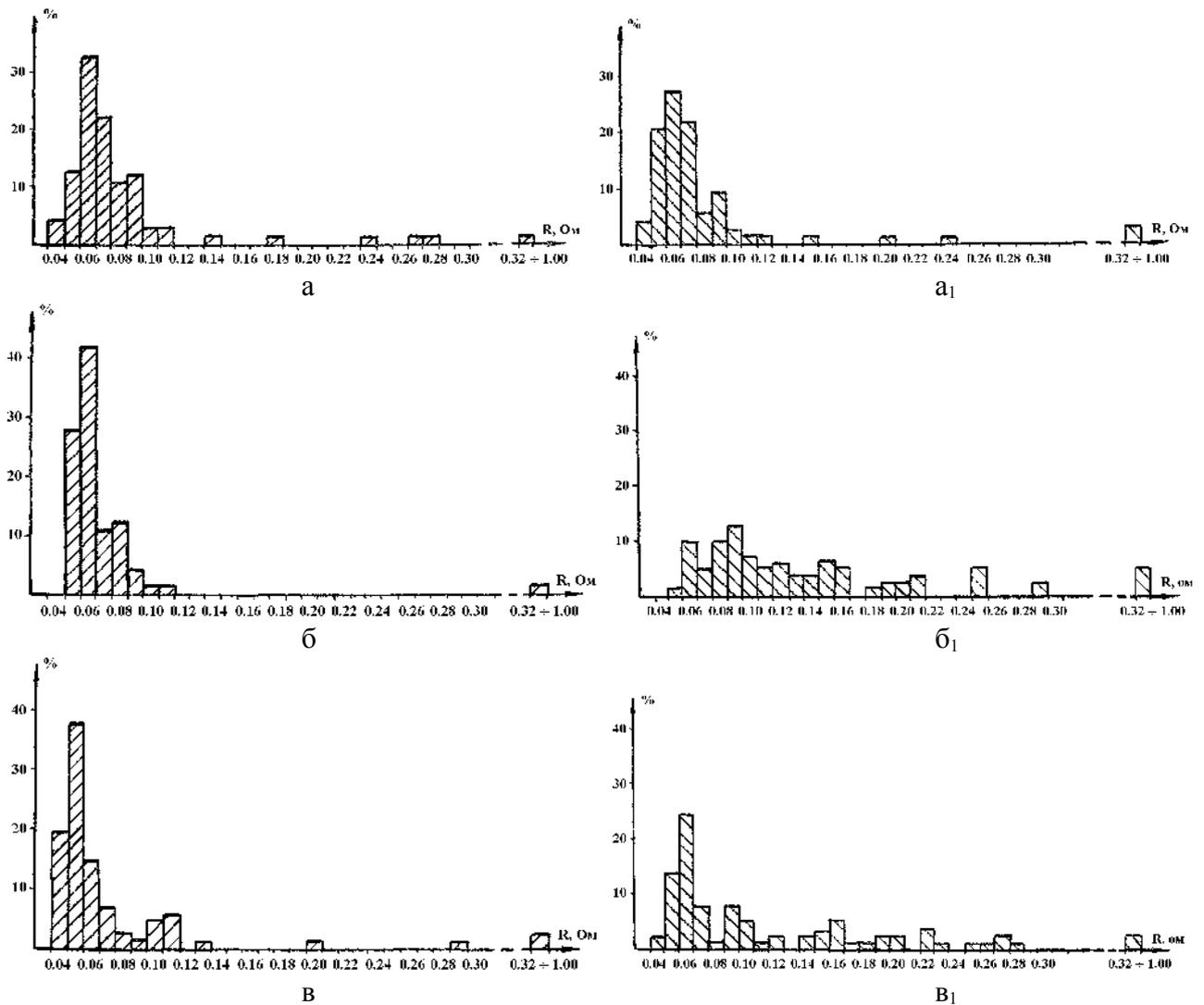


Рис. 4. Распределение МК типа КЭМ-3 по переходному сопротивлению нормально разомкнутой пары контактов в опытной и параллельной партиях: а, а₁ – исходные значения в опытной и параллельной партиях; б, б₁ – через 7 дней (б – после обработки); в, в₁ – через 40 дней (в – после обработки)

2.2. Низковольтные импульсные разряды

В [3] авторы предлагают проводить обработку поверхностей герконов с гальваническими покрытиями последовательностью пробоев при размыкании прибора.

Обработка герконов по данному способу осуществляется на установке, функциональная схема которой приведена на рис. 5.

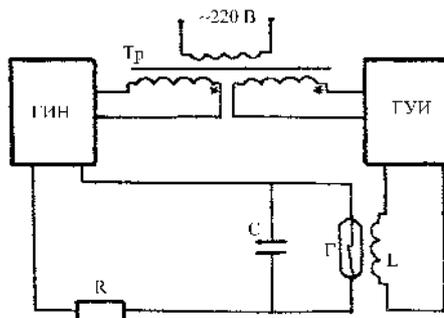


Рис. 5. Принципиальная схема устройства для обработки герконов последовательностью пробоев

Согласно [3], «обработка осуществляется бесплазменными импульсными разрядами, возникающими в результате автоэмиссии электронов при расстояниях между контакт-

детальми геркона $(1 - 10) \cdot 10^{-5}$ см и напряженности электрического поля $E > (1 - 10) \cdot 10^6$ В/см».

В результате пробоев на поверхностях контактов образуются эрозионные лунки (рис. 6), перекрытие которых в процессе обработки приводит к формированию сплавленной поверхности с низким сопротивлением.

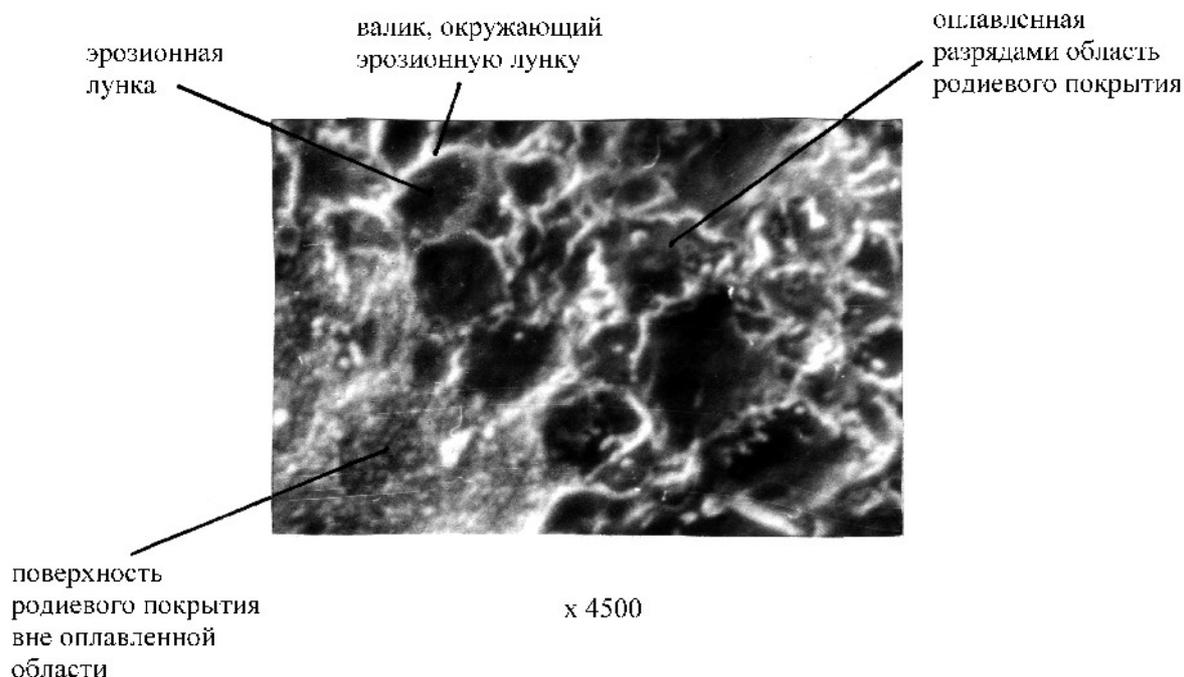


Рис. 6. Фотография участка поверхности с эрозионными лунками

Установка работает следующим образом. Генератор управляющих импульсов (ГУИ) обеспечивает срабатывание геркона с частотой 100 Гц. Генератор импульсов напряжения (ГИН) формирует двухполярные импульсы с частотой 50 Гц и амплитудой 250 В, которые заряжают конденсатор С через резистор R. Особенностью установки является то, что конденсатор оказывается заряженным в начале каждого периода размыкания контактных деталей геркона, в то время как при замыкании геркона напряжение отсутствует.

Использование данного метода на герконах с родиевым покрытием показало, что при определенных условиях возможно снижение сопротивления у определенного процента (75 – 80) обработанных герконов без разрушения гальванического покрытия.

3. Методы модификации поверхности железоникелевых контактов

3.1 Низковольтные импульсные разряды (автоколебания)

Авторы работы [4] для очистки и тренировки контактирующих поверхностей геркона предлагают использовать также низковольтные импульсные разряды, но образующиеся в процессе автоматических, а не вынужденных, как в [3], колебаний контактных пружин. Однако физические процессы, происходящие при автоколебаниях, и их влияние на основные параметры геркона в работе [4] не рассматривались. Кроме того, область применения установки ограничилась авторами работы [4] только тренировкой контактов (со специальными покрытиями из благородных металлов), повышающей нагрузочную способность герконов.

В данном разделе приводятся результаты использования низковольтных импульсных разрядов в промышленных масштабах для очистки от загрязнений и придания антикоррозионных и антиэрозионных свойств рабочим поверхностям контактных пружин,

изготовленных из пермаллоя и не защищенных от коррозии и эрозии специальными покрытиями.

Схема и принцип работы установки

Функциональная схема установки, обеспечивающая режим автоколебаний, представлена на рис. 7. Для обработки геркона на обмотку L_1 с трансформатора подается переменный ток, создающий в ней магнитодвижущую силу (МДС), которая обеспечивает срабатывание тренируемого геркона. При срабатывании геркона через него с того же источника на обмотку L_2 поступает электрический ток, создающий магнитодвижущую силу в данной обмотке, но противоположного знака по отношению к МДС обмотки L_1 , так как обмотки включены встречно. Созданная МДС обмотки L_2 компенсирует МДС обмотки L_1 , и геркон размыкается. При размыкании геркона исчезает МДС обмотки L_2 , и геркон вновь замыкается. При замыкании геркона вновь создается МДС обмотки L_2 , которая компенсирует МДС обмотки L_1 , и геркон опять размыкается.

Таким образом, тренируемый геркон коммутирует переменный электрический ток частотой 50 герц, фактически не замыкаясь механически. При этом частота колебаний его контактов может достигать несколько тысяч герц.

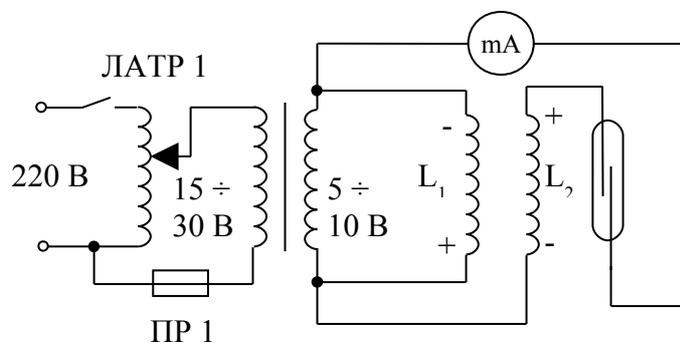


Рис. 7. Принципиальная схема установки для тренировки герконов методом автоколебаний

Особенности низковольтного импульсного разряда при автоколебаниях

Более 40 лет назад Разумихиным в работе [6] были проанализированы и приведены некоторые характерные особенности низковольтного импульсного разряда на малых межэлектродных промежутках, наблюдаемые из опытов:

а) Средняя напряженность электрического поля между электродами E_{cp} , необходимая для возникновения разряда, зависит от материала электродов, чистоты и шероховатости их поверхности и имеет порядок 10^6 В/см. Максимальные значения напряженностей электрического поля вблизи микровыступов на поверхности электродов на чистых контактах достигают величины $30 \cdot 10^6$ В/см. Это находится в хорошем соответствии с мнением Шотки о том, что шероховатости на поверхности электродов увеличивают E на порядок. Электростатическое вытягивание мостиков способствует еще большему увеличению напряженностей поля в отдельных точках межэлектродного зазора. По измерениям Джермера пробой промежутка в 10 мкм в разреженном воздухе с давлением 10^{-3} мм рт. ст. происходит при $E_{cp} = (1.4 - 1.9) \cdot 10^6$ В/см, т.е. при тех же полях, что и при атмосферном давлении. Это указывает на то, что при низковольтных разрядах на межэлектродных расстояниях меньше 10 мкм, при атмосферном давлении воздуха имеют место «вакуумные» условия.

б) Напряжение, при котором происходит пробой, может быть значительно меньше 300В и на загрязненных контактах может достигать величины меньше 10 В. Минимальное напряжение, при котором возможен пробой, зависит от материала, чистоты поверхности

контакта, а также от сопротивления цепи. Аталла вывел соотношение между минимальным напряжением пробоя $U_{пр.мин}$ и сопротивлением цепи R :

$$U_{пр.мин}^2 = aR \quad (1)$$

Для палладия, например, $a = 4,2$ Вт.

в) Плотность тока в разрядном канале имеет порядок $10^8 - 10^9$ А/см² при времени формирования разряда, составляющем 10^{-7} секунд.

г) В процессе разряда имеет место бурное испарение металла электродов в местах максимального тока электростатической эмиссии. Появляется область повышенного давления паров металла в межэлектродном промежутке с давлением до 400 атм.

Таким образом, согласно п. а) [6], при сближении контактов в автоколебательном режиме на расстояниях $\ll 10$ мкм имеют место вакуумные условия и, следовательно, может произойти вакуумный пробой (ВП) при напряжении между электродами 10-20 В.

Этот вывод согласуется с [7], где дано условие возникновения ВП:

$$pd < 0,020.$$

Здесь p – давление остаточных газов в мм рт.ст., d – величина межэлектродного зазора при ВП в см. Тогда в герконе, где $p \approx 250$ мм рт.ст., низковольтный ВП может произойти при $d < 0,8$ мкм.

В [8, 9] дано соотношение между $U_{пр.мин}$ и максимальной величиной межэлектродного зазора при пробое d :

$$U_{пр.мин} = Ad^\gamma, \quad (2)$$

где $\gamma = 0,1 - 1$, A – коэффициент, определяемый из опытов.

Из (1), (2) для $\gamma = 0,5$ несложно получить соотношение между сопротивлением цепи R и максимальной величиной межэлектродного зазора d

$$d = kR, \quad (3)$$

$$k = a/A^2.$$

Рассмотрим некоторые морфологические, электрофизические и эмиссионные особенности поверхности пермаллового контакта, прошедшего до герметизации геркона перетяжку из прутка в проволоку, электрохимическую обработку, штамповку, обезжиривание и высокотемпературный отжиг в атмосфере водорода или азота.

Рельеф поверхности пермаллового контакта геркона в основном формируется при волочении и штамповке. АСМ-исследование [10] поверхности этой стадии показало шероховатый рельеф поверхности (средний перепад высот 600 нм). Выявлены [10] две наиболее типичные структуры микрорельефа. В первом случае (рис. 8) это совокупность протяженных неровностей (борозд) одного направления, которые являются следами волочения исходной проволоки или механического воздействия прессы. Ширина таких борозд составляет несколько микрон, длина – более 50 мкм.

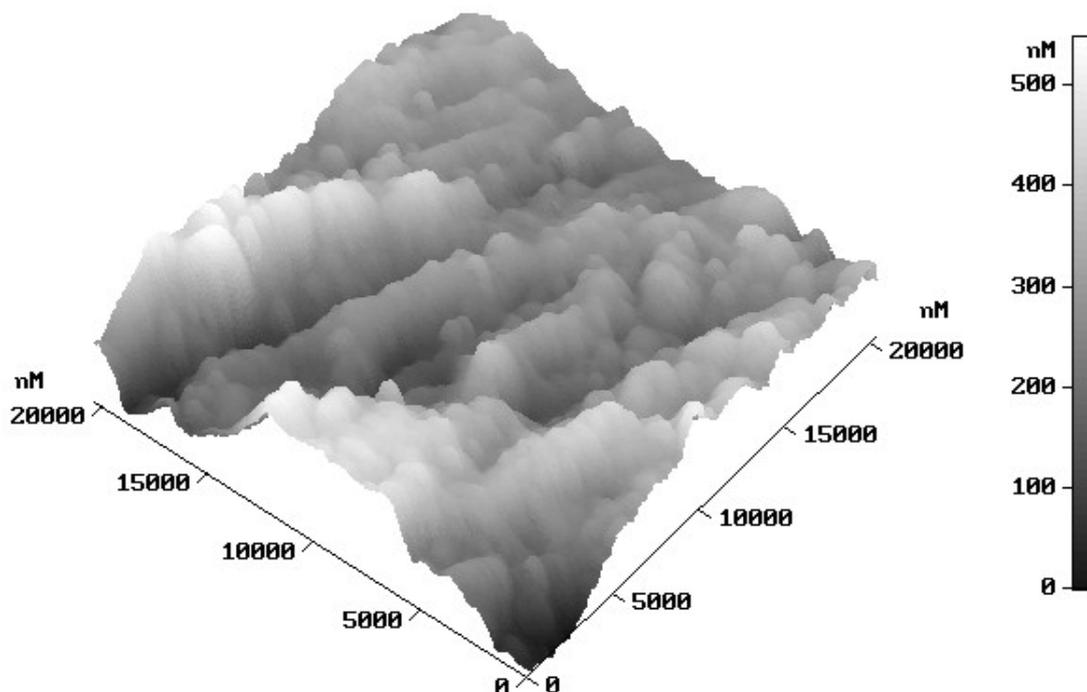
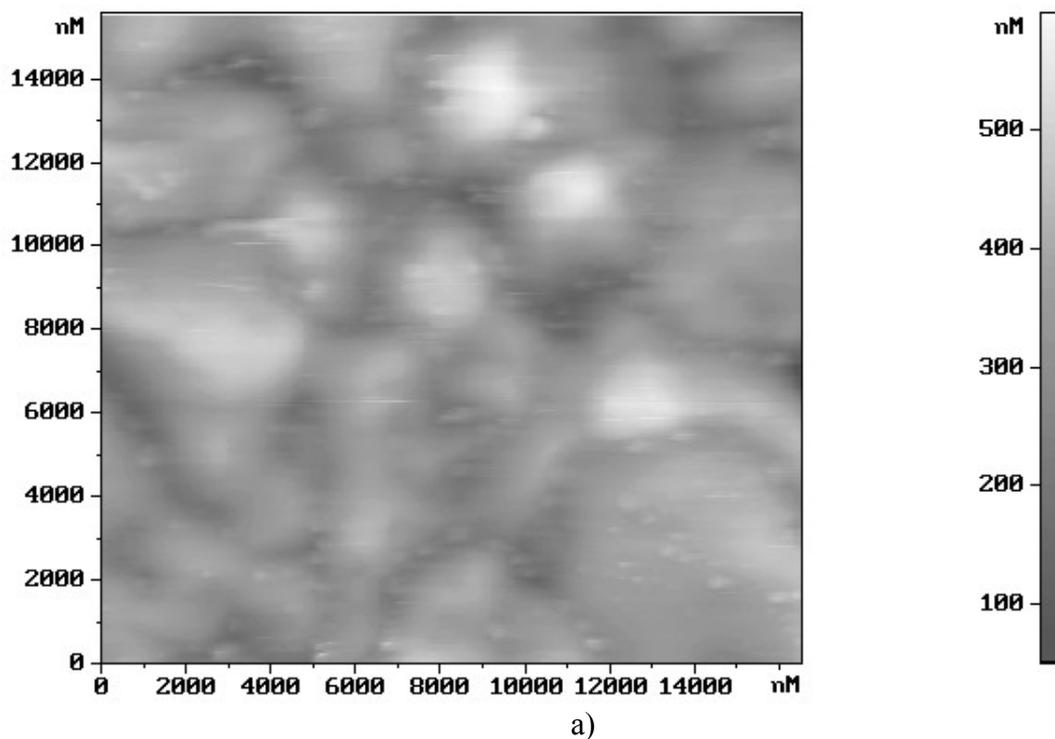


Рис. 8. Трехмерное АСМ-изображение участка поверхности пермаллоевой контакт-детали после штамповки со следами волочения исходной проволоки

Второй тип структуры (рис. 9) характерен для областей поверхности, где отсутствуют следы явного механического воздействия, и прослеживается «естественный» рельеф [10].



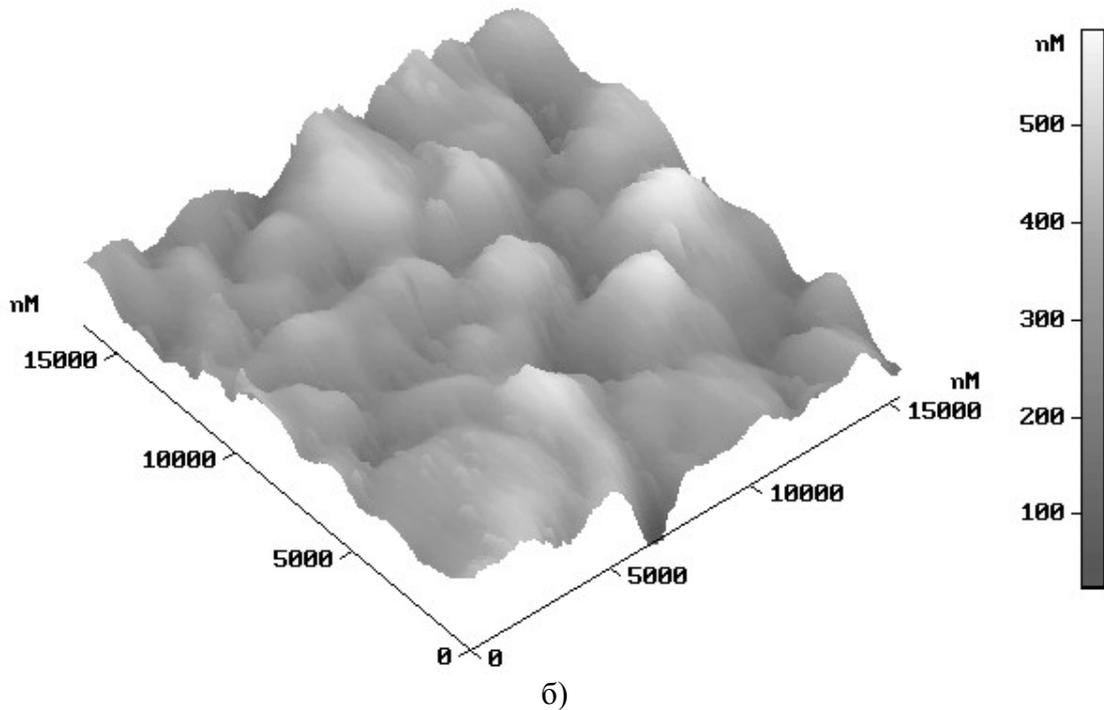


Рис. 9. АСМ-изображение участка поверхности пермаллоевой контакт-детали после штамповки, ячеистая структура: а) вид сверху; б) вид трехмерной поверхности

Согласно [11], переходное сопротивление $R_{пер}$ шероховатых поверхностей обусловлено сопротивлением стягивания r_c и сопротивлением пленки $r_{пл}$:

$$R_{пер} = r_c + r_{пл} \quad (4)$$

Для сферической модели неровностей [11]:

$$r_c = \frac{\rho}{4R} + \frac{\rho}{2\pi R} \left(\frac{\arccos M}{\sqrt{k(20k)(1-M^2)}} - \frac{1-k}{\sqrt{k(2-k)}} - 0.5 \right), \quad (5)$$

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

где h и R – высота и радиус микровыступов; ρ – удельное электрическое сопротивление.

В пленках существует несколько механизмов проводимости, но обычно в инженерных расчетах учитывают сопротивление туннельному эффекту [11]:

$$r_{тэ} \cong \frac{\sigma_{тэ}}{A_r}, \quad (6)$$

где $\sigma_{тэ}$ – удельное сопротивление пленки, а A_r – фактическая площадь контакта.

На поверхность контактов выходят зерна (микросталлы), ориентированные совершенно случайно, на ней имеются шероховатости (рис. 8, 9). Поэтому даже на «чистой», но шероховатой поверхности мы будем иметь набор пятен с различными значениями работы выхода электронов и переходного сопротивления. При изготовлении геркона поверхности контактов покрываются различными загрязнениями, т.е. покрываются сплошными диэлектрическими и (или) полупроводниковыми пленками, а также отдельными пятнами чужеродных атомов, молекул. В большинстве случаев в их состав входят С, О, К, Na, Cl, S, Ca [3, 12-15]. Например, атомы С, О создают на поверхности электроотрицательный слой, повышающий работу выхода [16]. Щелочные металлы (К, Na), наоборот, образуют на поверхности электроположительные слои и понижают работу выхода [16]. Таким образом, эффект мозаичности (работы выхода и электросопротивления) существенно усиливается при загрязнении поверхности контактов.

Можно предположить, что очистка поверхности низковольтными импульсными разрядами (с учетом морфологических, электрофизических и эмиссионных особенностей поверхности пермаллового контакта геркона) будет происходить поэтапно от пятна к пятну по мере убывания переходного сопротивления пятен (рис. 10).

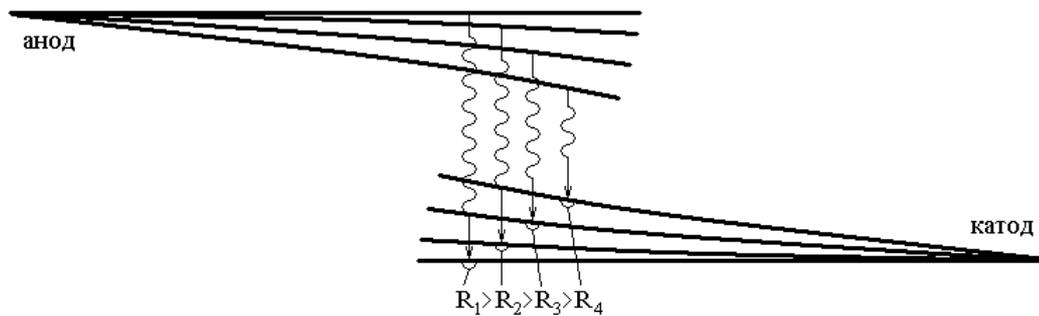


Рис. 10. Схема модификации поверхности низковольтными импульсными разрядами

Очистка и сглаживание микровыступов рабочей поверхности контактных пружин геркона осуществляется импульсными разрядами, возникающими в результате ВП при расстояниях между контактами геркона $(1 - 10) \cdot 10^{-5}$ см и напряженности электрического поля $(1 - 10) \cdot 10^6$ В/см.

Вследствие высокой плотности тока происходит взрывное испарение микровыступов на катоде, образуется катодный плазменный факел, а затем – анодный [17, 18]. В результате на поверхности обоих контактов образуются эрозийные лунки, глубина которых составляет десятые доли микрона, а диаметр достигает нескольких микрон. Электрическая схема для реализации метода (рис. 7) не допускает чрезмерного увеличения эрозионных лунок и сваривания контактов. Контакты фактически не касаются друг друга. Для обеспечения одинаковой обработки обоих контактов направление импульсов тока изменяется на противоположное с частотой 50 Гц. При увеличении количества разрядов происходит перекрытие близкорасположенных лунок, и на поверхности контактных пружин появляется оплавленная область площадью около 100×100 мк² за 1-5 сек. обработки, по которой и происходит контактирование в процессе эксплуатации прибора. При этом микроструктура электродов изменяется, так как происходит напыление материала с противоположного электрода. Напыленный материал имеет размер пор значительно меньший, чем царапины, трещины, которые остаются после механической обработки. В результате испарения загрязнений, сглаживания микровыступов и напыления материала переходное сопротивление геркона уменьшается. Высокое качество очистки и сглаживания поверхности достигается вследствие преимущественного возникновения разрядов на микровыступах и загрязненных участках. Фактически при автоколебаниях контактных пружин геркона в межэлектродном промежутке и на поверхности контактов происходят такие же процессы, как и при тренировке (кондиционировании) электродов вакуумных высоковольтных приборов микропробоями [8, 9].

Режим, при котором происходит обработка поверхности контактных пружин герконов:

- напряжение на герконе от 5 до 20 В;
- ток через геркон от 15 до 30 мА;
- длительность тренировки от 1 до 5 с.

Эффективность очистки

Определение эффективности очистки автоколебаниями осуществлялось следующим образом. Были изготовлены две опытные партии замыкающих герконов типа МКА-14108 (с азотным и аргоновым наполнениями), главная отличительная особенность которых, по сравнению с серийно выпускаемыми герконами типа МКА-14103 [19], заключалась в отсутствии на поверхности пермаллоевых контактных пружин специальных покрытий из благородных металлов [20]. Сопротивление герконов в этих двух партиях было выше установленной нормы 0,11 Ом для герконов МКА-14103 и находилось в пределах 0,15 – 0,4 Ом. Обработка производилась на установке, схематично изображенной на рис. 7, в течение 1-5 сек. при напряжениях 10-15 В. На рис. 11 приведены гистограммы распределения значения R герконов до и после обработки автоколебаниями.

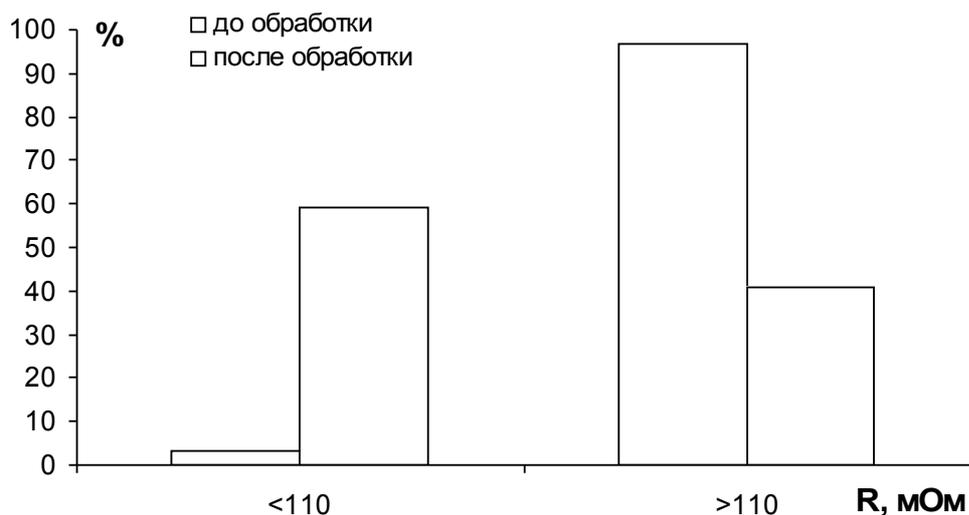


Рис. 11. Распределение герконов МКА-14108 по сопротивлениям до и после обработки автоколебаниями

Видно, что после обработки более половины герконов имеют сопротивление $\leq 0,11$ Ом (норма приборов МКА-14103). Исследование контактов методом оптической микроскопии показало, что при обработке поверхности пермаллоевых контактов образуются оплавленные области, содержащие мелкие (порядка нескольких мкм) эрозионные лунки, окруженные валиками (рис. 12).

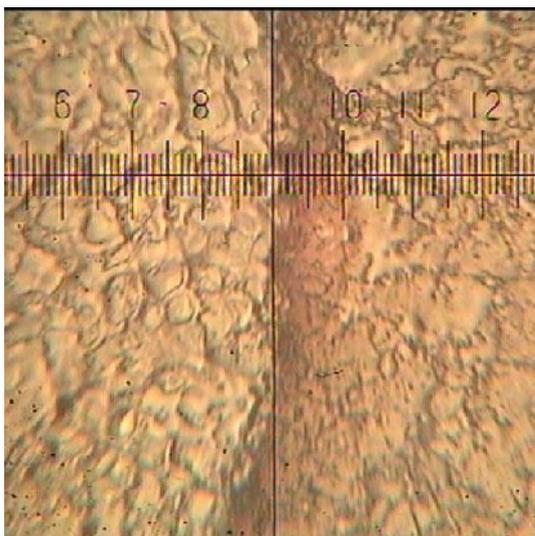


Рис. 12. Вид поверхности после обработки автоколебаниями. Слева расположена обработанная область, справа – необработанная. Увеличение 1000, размер деления – 1 мкм

Анализ контактов методом оже-электронной спектроскопии также показал, что при обработке происходит очистка поверхности в обработанной автоколебаниями области [14]. Состав обнаруженных загрязнений поверхности пермаллоевых контактов (вне зоны обработки автоколебаниями) в основном совпадает с элементарным составом загрязнений, обнаруженных на поверхности контактов герконов КЭМ-3, МКА-07101, МКА-14103, с покрытием из благородных металлов [12, 13]. В [12, 13] обсуждаются некоторые источники этих загрязнений. По-видимому, такой спектр загрязнений поверхности контактных пружин является характерным для данного производства герконов.

Ежемесячные измерения в течение года опытных образцов герконов, контакты которых были предварительно обработаны автоколебаниями, показали, что это сопротивление при длительном хранении остается практически неизменными (рис. 13). Это

значит, что диэлектрические и/или полупроводниковые пленки на поверхности пермаллоевых контактов без наработки не образуются (по крайней мере, в течение года).

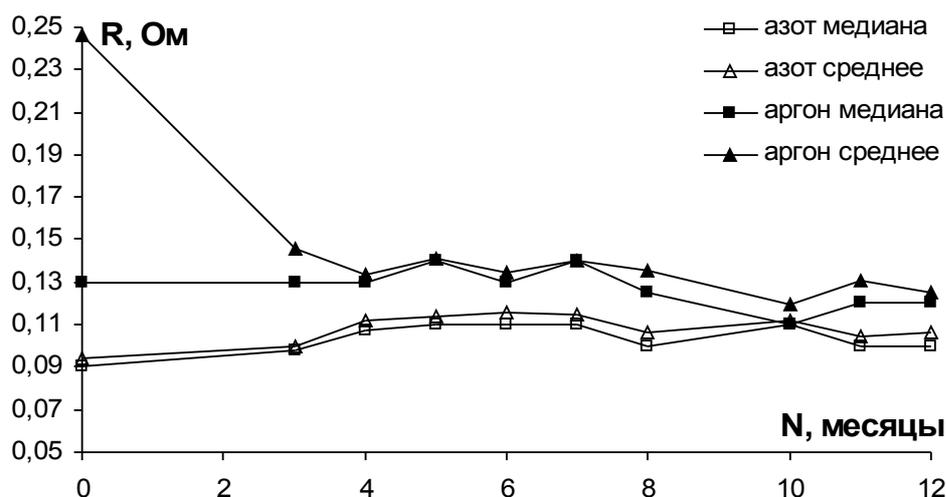


Рис. 13. Результаты ежемесячных измерений сопротивлений герконов МКА-14108 после обработки методом автоколебаний

Испытания на безотказность

Сравнительные испытания серийно выпускаемых герконов МКА-14103 и опытных образцов герконов (с азотным и аргоновым наполнением, необработанных и обработанных автоколебаниями) показали, что наработка опытных герконов предварительно обработанных автоколебаниями соответствует требованиям, предъявляемым к долговечности серийных приборов (табл. 1). Однако у этих герконов после окончания коммутационных испытаний наблюдается некоторый рост переходного сопротивления.

Таблица 1

Режим коммутационных испытаний	Тип геркона	Без сбоев, %	R _{max} до испытаний, Ом	R _{max} после испытаний, Ом
50 мВ - 5 мкА, 100 Гц, 10 ⁶ срабатываний	МКА-14103	100	0,1	0,1
	N, без обработки	21	0,25	100
	N, с обработкой	100	0,11	1,8
	Ar, без обработки	33	0,24	63,4
	Ar, с обработкой	100	0,9	9,5
5 В - 10 мА, 100 Гц, 10 ⁶ срабатываний	МКА-14103	100	0,17	0,11
	N, без обработки	27	0,35	22,7
	N, с обработкой	100	0,18	2,25
	Ar, без обработки	60	0,47	28,4
	Ar, с обработкой	54	0,66	19,5
20 В - 0,5 А, 50 Гц, 5·10 ⁶ срабатываний	МКА-14103	38	0,16	40
	N, без обработки	47	0,31	0,11
	N, с обработкой	87	0,26	0,13
	Ar, без обработки	53	0,4	0,1
	Ar, с обработкой	73	0,65	0,15
24 В - 400 мА, 50 Гц, 5·10 ⁵ срабатываний	МКА-14103	100	0,13	0,5
	N, без обработки	100	0,29	0,11
	N, с обработкой	100	0,17	0,13
	Ar, без обработки	93	0,3	0,12
	Ar, с обработкой	100	0,51	0,12
36 В - 15 мА, 50 Гц,	МКА-14103	25	0,2	8,7
	N, без обработки	53	0,49	0,34

5·10 ⁶ срабатываний	N, с обработкой	93	0,11	0,25
	Ag, без обработки	20	0,28	0,47
	Ag, с обработкой	60	0,46	9
50 В - 50 мА, 50 Гц, 5·10 ⁵ срабатываний	МКА-14103	100	0,14	0,22
	N, без обработки	100	0,38	0,25
	N, с обработкой	100	0,16	0,31
	Ag, без обработки	100	0,65	0,22
	Ag, с обработкой	100	0,21	0,26
100 В - 100 мА, 50 Гц, 5·10 ⁵ срабатываний	МКА-14103	100	0,17	0,19
	N, без обработки	100	0,27	0,23
	N, с обработкой	100	0,19	0,14
	Ag, без обработки	100	0,39	0,21
	Ag, с обработкой	100	0,22	0,16

Испытания на безотказность в режимах 50 мВ – 5 мкА и 5 В – 10 мА (микрорежимах) для герконов, обработанных автоколебаниями, показали, что после 10⁶ срабатываний сопротивления герконов становятся выше нормы.

Рост переходного сопротивления в микрорежимах, по-видимому, связан с образованием поверхностных диэлектрических пленок в области контактирования из адсорбированных на ее поверхности чужеродных атомов и молекул. Подобный рост переходного сопротивления в зависимости от количества срабатываний наблюдается в режиме холостого хода (рис. 14).

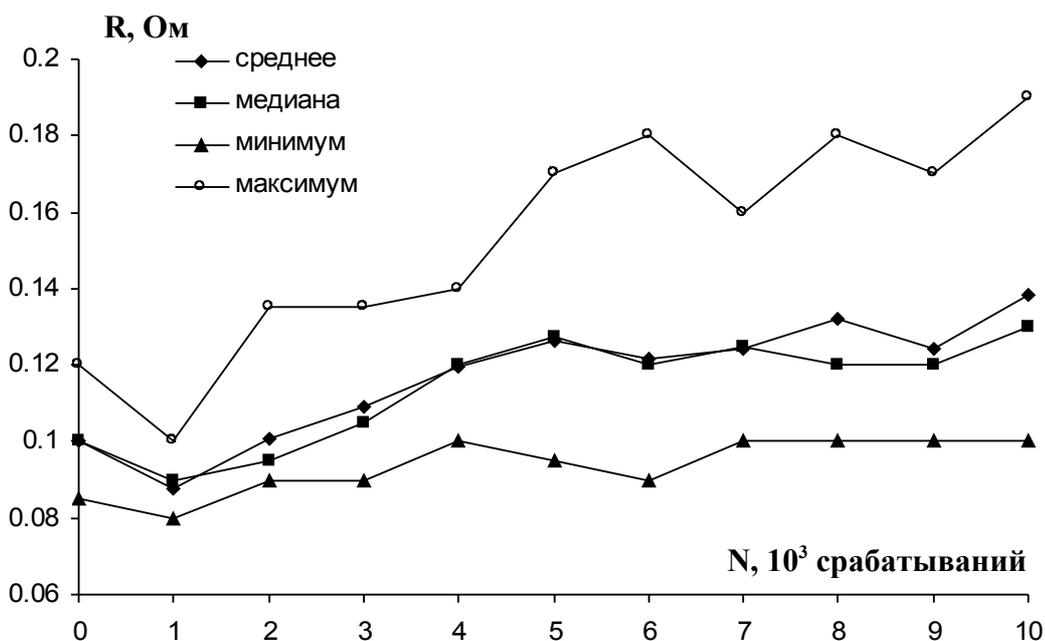


Рис. 14. Изменения сопротивлений герконов МКА-14108, обработанных автоколебаниями, в процессе последовательной наработки на холостом ходу

3.2. Высоковольтные импульсные разряды

Неспособность метода автоколебаний обеспечить долговременную работу герконов без гальванических покрытий в микрорежимах привело к необходимости поиска иного способа коллективной обработки герконов. Естественным образом внимание привлекли методы ионно-плазменной обработки (ИПО).

При ИПО изменение химического состава поверхностных слоев достигается в результате их взаимодействия с плазмой, в которой осуществляется нагрев. При изменении

химического состава поверхностного слоя изменяются его фазовый состав и микроструктура.

В основе любой разновидности ИПО лежат процессы диссоциации, адсорбции, диффузии.

Для осуществления процессов адсорбции и диффузии необходимо, чтобы насыщающий элемент взаимодействовал с основным металлом, образуя твердые растворы или химические соединения.

Разновидностями ИПО являются:

- цементация (насыщение поверхностного слоя углеродом);
- нитроцементация или цианирование (насыщение поверхностного слоя одновременно углеродом и азотом);
- азотирование (насыщение поверхностного слоя азотом).

При азотировании увеличиваются не только твердость и износостойкость, но также повышается коррозионная стойкость.

При азотировании изделия загружают в герметичные печи, куда с определенной скоростью поступает аммиак NH_3 . При нагреве аммиак диссоциирует по реакции: $2\text{NH}_3 \rightarrow 2\text{N} + 3\text{H}_2$. Атомарный азот поглощается поверхностью и диффундирует вглубь изделия.

Значительное сокращение времени азотирования достигается при ионном азотировании. Принцип действия ионного азотирования заключается в том, что в разреженной азотсодержащей газовой среде между катодом (деталью) и анодом (стенками вакуумной установки) возбуждается тлеющий разряд, и положительные ионы с высокой энергией, бомбардируя поверхность детали, нагревают ее до температуры насыщения и внедряются в нее, формируя твердый раствор азота в металле, а при достижении предела растворимости – нитридные фазы. Структура азотированного слоя в общем случае состоит из двух зон: внешней – нитридной зоны и располагающейся под ней диффузионной зоны, состоящей из твердого раствора с дисперсными включениями промежуточных фаз [5, 21-23].

Для исследования возможностей ИПО герконов на первом этапе в качестве высокочастотного генератора, возбуждающего плазму в зазоре контакт-деталей геркона, использовался искровой течеискатель «Тесла» (рис. 15).

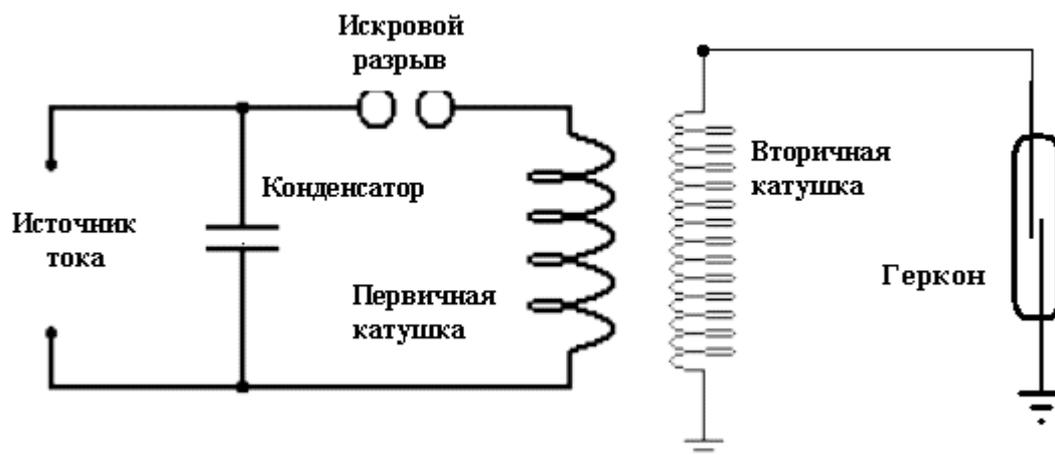


Рис. 15. Схема установки для обработки герконов на течеискателе «Тесла»

Образцами являлись герконы МКА-14108, конструктивно выполненные на базе серийных приборов МКА-14103. Основная отличительная особенность этих герконов по сравнению с серийными приборами заключалась в отсутствии каких-либо специальных покрытий на пермалловых контактах. Контактные пружины штамповались из проволоки, обезжиривались и отжигались в атмосфере азота или водорода. В качестве газового наполнения при герметизации использовался спектрально чистый (99,999%) азот.

После герметизации давление газа в баллоне геркона достигает 270-300 мм рт.ст., а в составе газового наполнения можно обнаружить незначительное количество водорода и (или) углекислого газа (рис. 16).

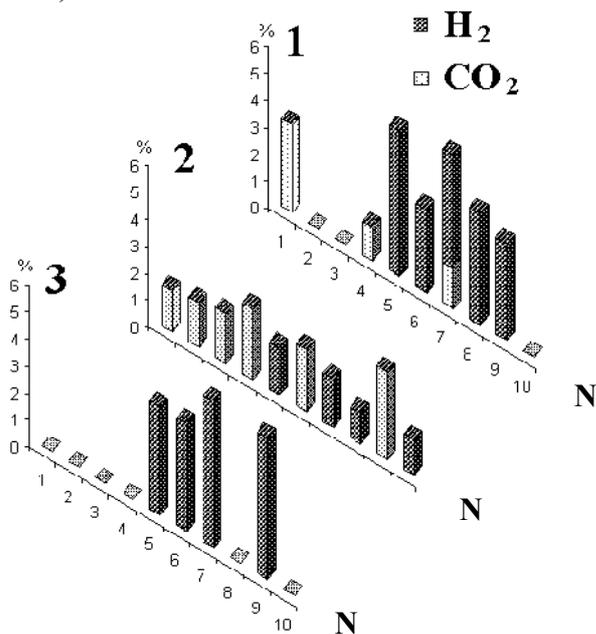


Рис. 16. Процентное содержание примесей в газовом наполнении герконов после: 1) заварки; 2) обработки методом автоколебаний; 3) обработки на течеискателе «Тесла». N – номер геркона

В процессе изготовления и заварки контакт-деталей происходит их загрязнение. На поверхности контакт-деталей, извлеченных из прибора МКА-14108, методом электронной оже-спектроскопии можно обнаружить окислы железа, никеля, кремния, а также другие химические соединения, в состав которых входят атомы углерода, кислорода, азота, серы, хлора (рис. 17) [15].

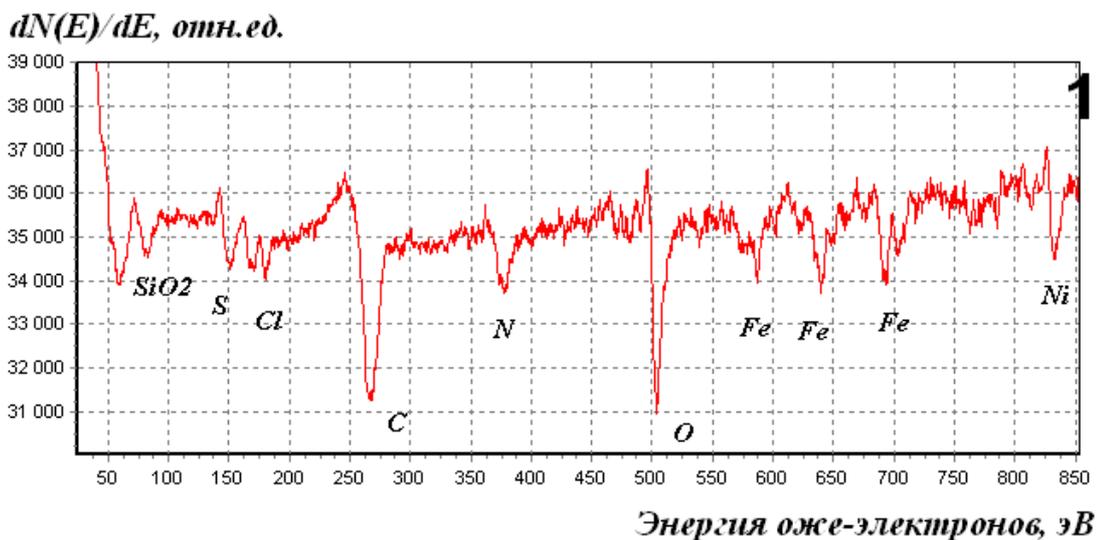


Рис. 17. Оже-спектр контактной поверхности геркона после его заварки
В результате образования паразитных покрытий сопротивление опытных образцов герконов было выше установленной нормы 0,11 Ом и находилось в пределах 0,15 – 0,4 Ом (рис. 18).

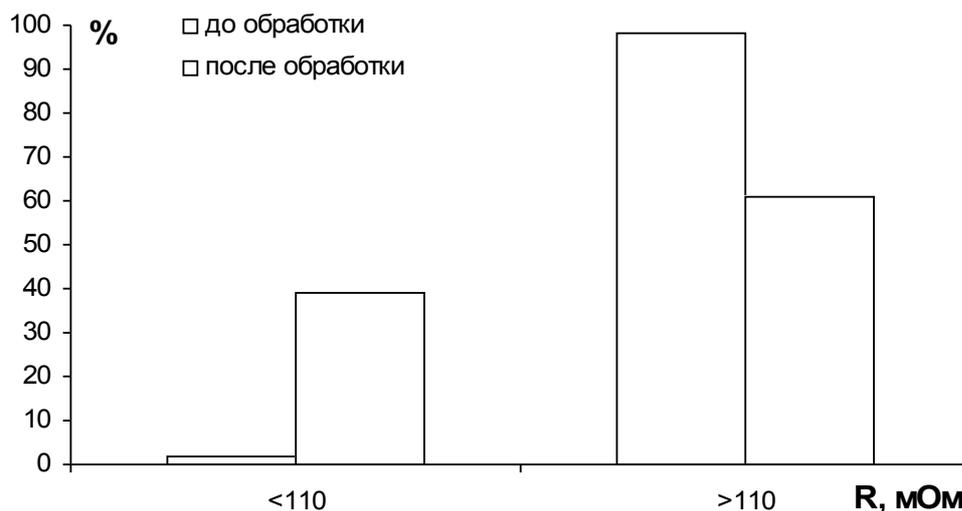


Рис. 18. Распределение герконов МКА-14108 по сопротивлениям до и после обработки на течеискателе «Тесла»

Высоковольтные разряды ($U \sim 1$ кВ) инициируются на разомкнутых контактах геркона ($d = 25 - 35$ мкм) с частотой 800-1000 Гц с помощью течеискателя. В результате в герконе возбуждается газовый разряд. Наиболее интенсивно разряд горит в области перекрытия контакт-деталей. В процессе горения разряда происходит распад поверхностных загрязнений из-за нагрева контактов, ионной и электронной бомбардировки, изменение морфологии поверхности в результате ионной бомбардировки, изменение состава поверхности контактов в результате плазмохимических реакций, имплантации ионов и диффузии атомов газа-наполнителя. Продукты распада органических и неорганических соединений удаляются из области интенсивного горения разряда и либо осаждаются на окружающих холодных областях контактов и баллона, либо образуют поверхностные пленки на контактах за областью перекрытия. Это приводит к значительному понижению сопротивления геркона.

На рис. 18 приведены значения $R_{пер}$ герконов до и после обработки на течеискателе «Тесла».

Видно, что результат обработки на искровом течеискателе «Тесла» хуже (несколько выше сопротивление герконов), чем при обработке автоколебаниями. Это связано с особенностью функционирования течеискателя. В частности, нет возможности точно выдержать частоту разрядов и напряжение в процессе обработки.

Тем не менее, анализ газового наполнения герконов после заварки, после автоколебаний и обработки на течеискателе «Тесла» показал, что ИПО приводит к очищению газового наполнения геркона от углекислого газа (рис. 16). Отсутствие в газовом наполнении углекислого газа, служащего основным источником углерода и связанных с ним загрязнений, значительно улучшает стабильность сопротивления геркона в процессе коммутаций.

Результаты совместных коммутационных испытаний герконов МКА-14108, обработанных методом автоколебаний и на течеискателе «Тесла», приведены в таблице 2.

Результаты коммутационных испытаний герконов без гальванопокрытий с азотным наполнением

Режим коммутационных испытаний	Метод обработки	Без сбоев, %	R _{max} до испытаний, Ом	R _{max} после испытаний, Ом
50 мВ - 5 мкА, 100 Гц, 10 ⁶ срабатываний	течеискатель «Тесла»	100	0,16	0,2
	автоколебания	0	–	–
5 В - 10 мА, 100 Гц, 10 ⁶ срабатываний	течеискатель «Тесла»	100	0,12	0,42
	автоколебания	50	0,1	4,5
20 В - 0,5 А, 50 Гц, 5·10 ⁶ срабатываний	течеискатель «Тесла»	100	0,15	0,1
	автоколебания	100	0,11	0,15
24 В - 400 мА, 50 Гц, 5·10 ⁵ срабатываний	течеискатель «Тесла»	100	0,17	0,37
	автоколебания	100	0,2	0,1
36 В - 15 мА, 50 Гц, 5·10 ⁶ срабатываний	течеискатель «Тесла»	100	0,15	0,12
	автоколебания	93	0,09	0,85
50 В - 50 мА, 50 Гц, 5·10 ⁵ срабатываний	течеискатель «Тесла»	100	0,13	0,12
	автоколебания	100	0,11	0,12
100 В - 100 мА, 50 Гц, 5·10 ⁵ срабатываний	течеискатель «Тесла»	100	0,15	0,11
	автоколебания	100	0,08	0,22

По результатам измерений становится ясно, что метод плазменной обработки дает лучшие результаты практически во всех режимах испытаний по сравнению с герконами, обработанными методом автоколебаний, которые, в свою очередь, превосходят серийные приборы МКА-14103 (кроме испытаний в режимах малых токов).

Таким образом, ИПО позволяет получать герконы без специальных покрытий, не уступающие по своим техническим характеристикам герконам с гальваническими покрытиями из благородных металлов. Однако принцип работы течеискателя не дает возможности использовать этот прибор для проведения групповой обработки герконов.

Для решения этой задачи была разработана специальная установка [24] (рис. 19). В ней два высоковольтных генератора одновременно обрабатывают по 11 шт. герконов (каждый), соединяемых в электрическую цепь последовательно с помощью устройства, представленного на рис. 20. При этом производительность работы установки может достигать 2400 герконов в час.



Рис. 19. Общий вид установки для коллективной обработки герконов

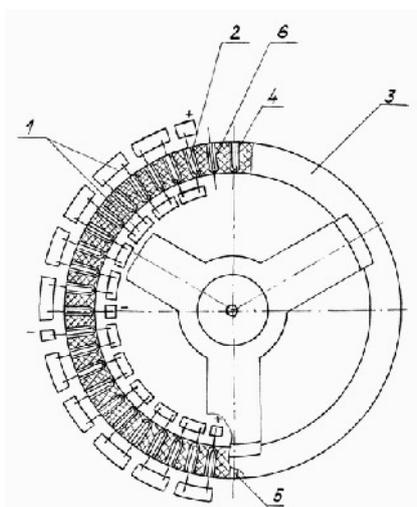
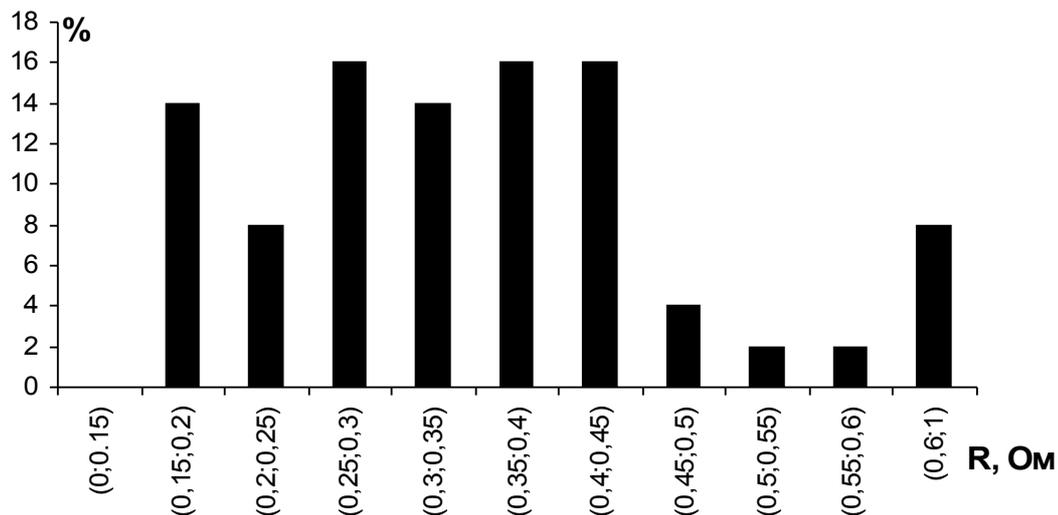
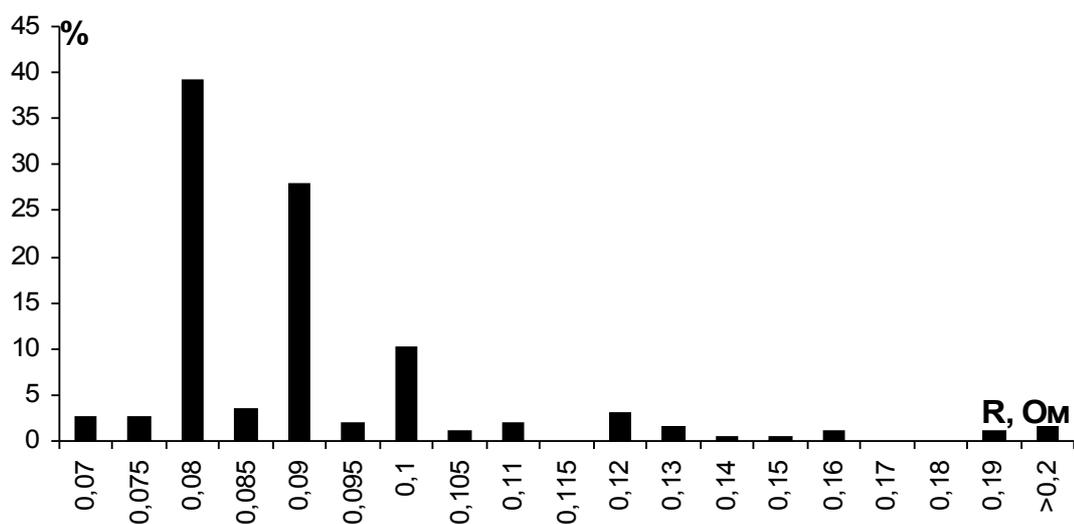


Рис. 20. Устройство для последовательного включения герконов перед коллективной обработкой [24]

Распределение сопротивлений герконов МКА-14108 до и после коллективной модификации поверхности приведено на рис. 21. Высокая стабильность частоты импульсов тока и напряжения позволяет получить существенно лучшие результаты обработки по сравнению с обработкой на течеискателе «Тесла».



а)



б)

Рис. 21. Распределение сопротивлений герконов МКА-14108 (без гальванопокрытия) до (а) и после (б) коллективной модификации поверхности [24]

Результаты испытаний на безотказность в режимах малых токов герконов, обработанных с помощью «Тесла» и групповым методом, представлены в таблице 3.

Таблица 3

Режим коммутационных испытаний герконов МКА-14108	Метод обработки	Без сбоев, %	R	
			до испытаний, Ом	после испытаний, Ом
50 мВ - 5 мкА, 100 Гц, 10 ⁶ срабатываний	течеискатель «Тесла»	100	0,105/0,1036	0,115/0,1357
	групповая обработка	100	0,09/0,1023	0,15/0,1677
5 В - 10 мА, 100 Гц, 10 ⁶ срабатываний	течеискатель «Тесла»	100	0,100/0,1000	0,200/0,2200
	групповая обработка	100	0,095/0,1014	0,15/0,1786

Испытания показали, что наработка опытных герконов, предварительно обработанных плазмой, независимо от типа (коллективной или индивидуальной) обработки, соответствует требованиям, предъявляемым к долговечности серийных приборов.

Таким образом, идея решения проблемы коррозионной и эрозионной устойчивости без применения покрытий из благородных металлов нашла свое экспериментальное подтверждение. Полученные результаты могут быть использованы при создании технологии производства герконов с модифицированной контактной поверхностью (вместо гальванопокрытия). Ниже, на рис. 22, приводится схема технологического маршрута производства таких герконов.

Анализ результатов, полученных в [5, 21-23], позволяет сделать предположение, что износостойкость, твердость и коррозионная стойкость контактов герконов МКА-14108 после ИПО обусловлены формированием в приповерхностной области контактов наноразмерных слоев, обогащенных азотом, кислородом, углеродом и их соединениями с железом, отличающихся друг от друга по химическому составу, структуре и толщине. Для проверки этой гипотезы методом электронной оже-спектроскопии в [15] был проведен послойный анализ приповерхностной области пермалловых контактов до и после ИПО, результаты которого подтвердили выдвинутую здесь гипотезу.

4. Заключение

Использование ионно-плазменных методов для модификации поверхностей готовых герконов с целью придания им заданных характеристик позволяет значительно упростить процесс производства герконов (исключив операции, связанные с подготовкой контактных деталей к нанесению гальванических покрытий, и собственно операцию электрохимического осаждения).

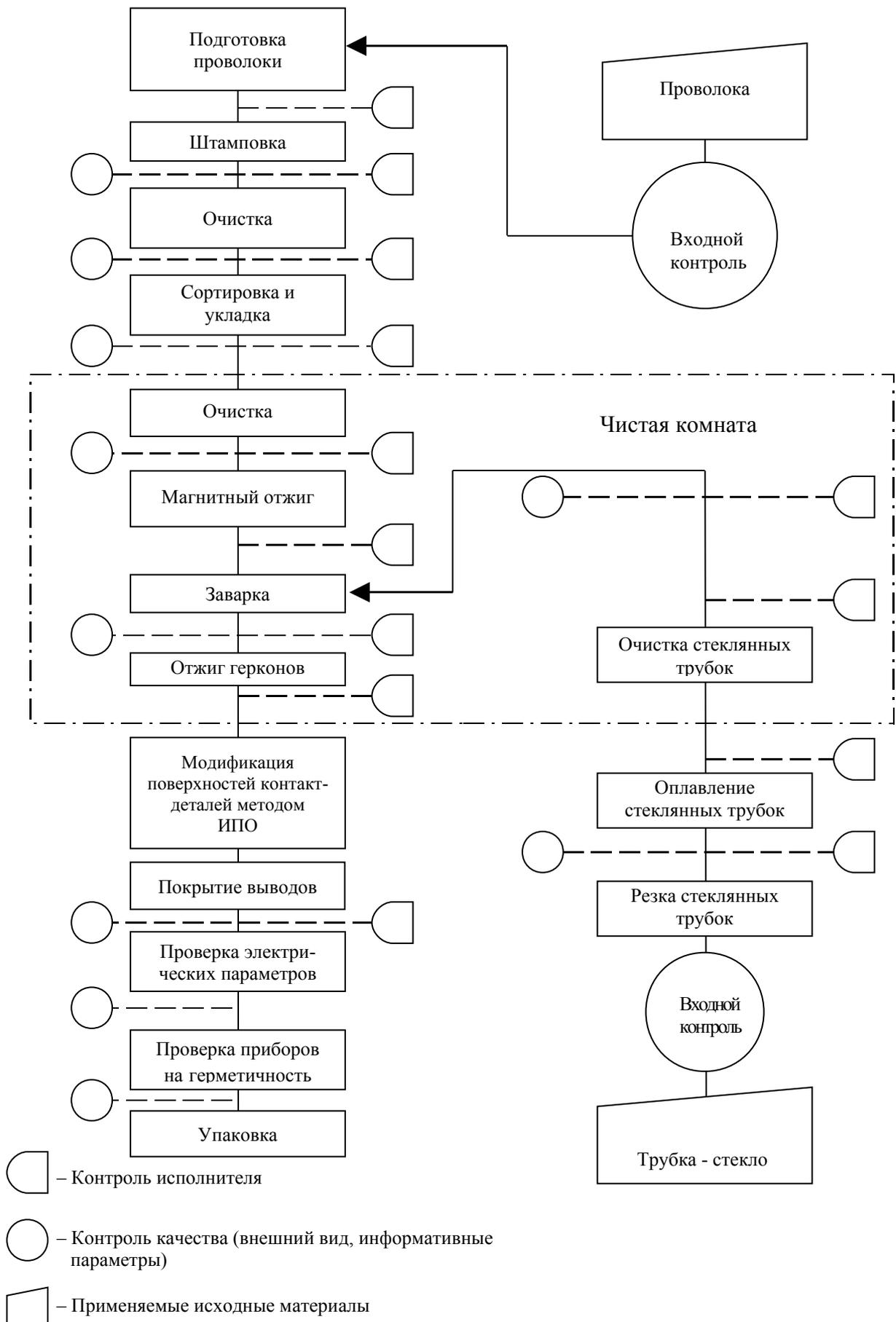


Рис. 22. Схема технологического маршрута производства герконов с модифицированной контактной поверхностью (вместо гальванопокрытия)

Литература:

1. Спиридонов Ю.С. Авторское свидетельство СССР № 385355, 1973.
2. Патент ПНР № 259668, 1978.
3. Мангутов Г.Ш., Фокин М.Н., Шрайнер Ю.А., Эрлихсон М.Г. Авторское свидетельство СССР № 1690011, 1989.
4. Удалов В.Ф., Игнатов А.И., Ермаков В.М. Авторское свидетельство СССР № 624307, 1977.
5. Абдуллин И.Ш., Желтухин В.С., Сагбиев И.Р., Юсупов О.Д. Высокочастотная плазма пониженного давления в процессах формирования нанослоев на поверхности конструкционных материалов // XXXIV Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, 12 – 16 февраля 2007 г.
6. Разумихин М.А. Эрозионная устойчивость маломощных контактов. – М.-Л.: Энергия, 1964. – 80 с.
7. Таблицы физических величин / Справочник. Под ред. акад. И.К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. – С. 427.
8. Татарина Н.В. Вакуумная электроизоляция (Обзор) // Вакуумная техника и технология. – 2003. – Т. 13. – № 1, С. 3.
9. Сливков И.Н. Процессы при высоком напряжении в вакууме. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 304 с.
10. Гололобов Г.П., Арефьев А.С., Трегулов В.Р., Уточкин И.Г., Киреева О.В. Исследование поверхности магнитоуправляемых контактов методом атомно-силовой микроскопии. – Рязань, 2003. – Вестник РГРТА, Вып. 13. – С. 66-69.
11. Ушаков И.А., Зуб В.И. Герконы (принцип действия, конструкции, расчет) / Учебное пособие. – Рязань, 1977. – 76 с.
12. Зельцер И.А., Некрасов Р.А. Магнитоуправляемые контакты (герконы) и изделия на их основе // Сборник трудов первой Международной научно-практической конференции «Магнитоуправляемые контакты (герконы) и изделия на их основе», 11–14 октября 2005 г. Под ред. д.т.н. С.М. Карабанова. – Рязань, 2005. – С. 56.
13. Зельцер И.А., Трунин Е.Б., Моос Е.Н. Магнитоуправляемые контакты (герконы) и изделия на их основе // Сборник трудов первой Международной научно-практической конференции «Магнитоуправляемые контакты (герконы) и изделия на их основе», 11–14 октября 2005 г. Под ред. д.т.н. С.М. Карабанова. – Рязань, 2005. – С. 66.
14. Кузнецов А.А., Васильев Е.В., Зельцер И.А., Черняк Е.Я. Анализ элементного и химического состава контактных зон герконов методом ЭОС // Сборник трудов второй Международной научно-практической конференции «Магнитоуправляемые контакты (герконы) и изделия на их основе», 1–3 октября 2008 г. Под ред. д.т.н. С.М. Карабанова. – Рязань: Изд. «Полиграф», 2009.
15. Зельцер И.А., С.М. Карабанов, Кузнецов А.А., Майзельс Р.М., Саблин В.А., Черняк Е.Я. Исследование ионно-плазменной модификации железо-никелевых герметизированных магнитоуправляемых контактов методом электронной оже-спектроскопии // Сборник трудов второй Международной научно-практической конференции «Магнитоуправляемые контакты (герконы) и изделия на их основе», 1–3 октября 2008 г. Под ред. д.т.н. С. М. Карабанова. Рязань: Изд. «Полиграф», 2009.
16. Шуппе Г.Н. Физические основы электронной техники. Часть II. Вопросы электронных и ионных эмиссий (виды эмиссий) / Учебное пособие. – Рязань: РРТИ, 1966. – 84 с.
17. Зельцер И.А., Кукушкин С.А., Саблин В.А., Моос Е.Н. IX Международный семинар «Структурные основы модификации материалов методами нетрадиционных технологий», (МНТ-IX), г. Обнинск, 12-16 июня 2007 г. Тезисы докладов. – С. 38.
18. Птицын В.Э. К проблеме пробоя вакуумной электроизоляции // Письма в ЖЭТФ. – 1992. – Т. 55, вып. 6. – С. 325-328.
19. Майзельс Р.М. Герконы. Перспективы применения. Новые разработки ОАО «РЗМКП» // Сборник трудов первой Международной научно-практической конференции

- «Магнитоуправляемые контакты (герконы) и изделия на их основе», 11–14 октября 2005 г. Под ред. д.т.н. С.М. Карабанова. – Рязань, 2005. – С. 3.
20. Быков А.Н., Локштанова О.Г. Использование рутениевого гальванопокрытия в производстве герконов. Особенности технологии // Сборник трудов первой Международной научно-практической конференции «Магнитоуправляемые контакты (герконы) и изделия на их основе», 11–14 октября 2005 г. Под ред. д.т.н. С.М. Карабанова. – Рязань, 2005. – С. 42.
 21. Лященко Б.А., Мироненко В.И., Радько О.В., Бобырь С.А. Особенности азотирования стали 30ХГСА в пульсирующем разряде. Вісник Чекаського національного університету. 2007, вип.117, сер. «Фізико-математичні науки». – С.107.
 22. Герцрикен Д.С., Тышкевич В.М. Тлеющий разряд и инертные газы в металлах. – Киев: Академперіодика, 2006. – 280 с.
 23. Ахмадеев Ю.Х., Гончаренко И.М., Иванов Ю.Ф., Коваль Н.Н., Щанин П.М. Азотирование технически чистого титана в тлеющем разряде с полым катодом. ПЖТФ, 2005. – Т.31, вып.13. – С. 24
 24. Карпов А.С., Майзельс Р.М., Шишкина Л.В., Шкутенко Л.Н. Установка для автоматической ионно-плазменной обработки герконов // Сборник трудов второй Международной научно-практической конференции «Магнитоуправляемые контакты (герконы) и изделия на их основе», 1–3 октября 2008 г. Под ред. д.т.н. С.М. Карабанова. – Рязань: Изд. «Полиграф», 2009.