

УДК 621.384.8

К.А. Арушанов, И.А. Зельцер

АППАРАТУРНЫЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СОЗДАНИЯ ГЕРКОНОВ С НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫМИ КОНТАКТНЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ

Проведены сравнительные испытания герконов МКА-14108, обработанных низко- и высоковольтными импульсными разрядами, и герконов МКА-14103. Показано, что модификация пермалловых контактирующих поверхностей ионно-плазменной обработкой позволяет исключить нанесение гальванопокрытий и снизить себестоимость приборов.

Ключевые слова: геркон, контакт, коррозия, эрозия, разряд, ион, плазма, поверхность.

Введение. Одной из основных технологических операций современного производства герконов является операция нанесения специальных (коррозионно- и эрозивно-стойких) покрытий на рабочие поверхности пермалловых контактных пружин герконов. При этом для нанесения покрытий в основном используется гальванотехнология, а в качестве материалов – благородные и драгоценные металлы (золото, палладий, родий, рутений и т.п.).

Проблемами существующих способов электроосаждения контактных покрытий герконов являются: большой расход и потери драгоценных материалов, большая длительность изготовления, сложность и дороговизна оборудования, большие энергетические затраты, сложность осаждения сплава заданного химического и фазового состава и заданной структуры, сложность получения тонких беспористых или толстых пленок с низкими внутренними напряжениями и с высокой адгезией к материалу контакт-детали.

Отказ от применения благородных металлов и методов их осаждения, а также отказ от неоправданно высокой универсальности выпускаемых герконов, могут позволить производить изделия с конкурентоспособным соотношением цены–качества.

Целью работы является экспериментальное исследование возможности изготовления герконов с модифицированной пермалловой контактной поверхностью (вместо гальванопокрытия из драгметаллов).

Образцы и методика эксперимента. 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 штампова-

лись из проволоки, обезжиривались и отжигались в атмосфере азота. В качестве газового наполнения при герметизации использовались спектрально чистые (99.999 %) азот и аргон.

Обработка контактных поверхностей проводилась низко- и высоковольтными импульсными разрядами.

Низковольтные разряды ($U = 10 - 20$ В) образовывались при вакуумном пробое на малых межэлектродных промежутках ($d < 1$ мкм) [1, 2] в процессе автоматических колебаний контактных пружин, возбуждаемых специально изготовленным по схеме [3] генератором. Частота следования разрядов достигала 10 кГц. Полярность электродов изменялась с частотой 50 Гц.

Инициирование вакуумного пробоя обусловлено присутствием на поверхности катода отдельных микронеоднородностей высотой порядка единиц мкм и интенсивной электронной эмиссией. Согласно [2] при сближении контактов в автоколебательном режиме на расстояниях $\ll 10$ мкм имеют место вакуумные условия и, следовательно, может произойти вакуумный пробой при напряжении между электродами 10-20 В.

Этот вывод согласуется с [1], где дано условие возникновения вакуумного пробоя:

$$pd < 0.020.$$

Здесь p – давление остаточных газов в мм.рт.ст., d – величина межэлектродного зазора в см. Тогда в герконе, где $p \approx 250$ мм.рт.ст., низковольтный вакуумный пробой происходит при $d < 0.8$ мкм.

Вначале возникает авто- затем термо- и, наконец, развивается аномальная термоэлектронная эмиссия. Вследствие высокой плотности тока происходит испарение микровыступов на катоде, образуется катодный плазменный факел, а затем, вследствие десорбции, стимулированной электронными возбуждениями, происходит ис-

парение материала анода и образуется анодный плазменный факел [4–6]. В результате в “вакуумном” зазоре образуются плазменный канал с высокой проводимостью, а на поверхности обоих контактов – эрозийные лунки, глубина которых составляет десятки доли микрона, диаметр – несколько микрон. Лунки окружены валиками. При увеличении количества разрядов происходит перекрытие близкорасположенных лунок и на поверхности контактных пружин появляется оплавленная область площадью около $100 \times 100 \text{ мкм}^2$ за 1–5 с обработки, по которой и происходит контактирование. В результате испарения загрязнений и сглаживания микровыступов в этой области переходное сопротивление геркона уменьшается.

Высоковольтные разряды ($U \sim 1 \text{ кВ}$) инициировались на разомкнутых контактах геркона ($d = 20 - 30 \text{ мкм}$) искровым течеискателем «Тесла». Для коллективной обработки герконов этими разрядами использовалась специально разработанная установка ионно-плазменной обработки (ИПО) [7]. В этом случае модификация поверхности происходит в результате ионного азотирования [8, 9].

Известно [2], что главный эффект действия коррозии и загрязнений на электрические контакты заключается в нарушении проводимости, поэтому сопротивление контактов этим процессам может характеризоваться числом замыканий, при котором наступает нарушение проводимости. Сопротивление контактов эрозии может также характеризоваться числом замыканий, при котором наступает неразмыкание контактов.

Экспериментальные образцы герконов (после обработок низко- и высоковольтными разрядами и без таковых, с азотным и аргоновым газовыми наполнениями) и приборы МКА-14103 подвергались сравнительным коммутационным испытаниям.

Испытания проводились на активную нагрузку и в режиме холостого хода.

Состояние поверхности контактов контролировалось методами оптической микроскопии, оже-электронной спектроскопии и по величине электрического сопротивления геркона R .

Это позволило оптимизировать режимы модификации низко- и высоковольтными разрядами поверхности контактных пружин экспериментальных образцов и изучить физические процессы, происходящие при этих обработках и коммутации контактов.

Результаты и их обсуждение. Сравнительные коммутационные испытания показали, что наработка опытных герконов МКА 14108, предварительно обработанных низковольтными разрядами, в основном соответствует требованиям, предъявляемым к долговечности серийных при-

боров МКА 14103 (см. таблицу).

Однако в микрорежимах у опытных образцов герконов после окончания коммутационных испытаний наблюдается рост R по сравнению с его начальным значением (см. таблицу).

Таблица

Режим коммут. испытаний	Тип герконов	Без сбоев, %	R_{\max} до испыт., Ом	R_{\max} после испыт., Ом
50 мВ - 5 мкА, 100 Гц, 10^6 срабатываний	МКА-14103	100	0.1	0.1
	МКА-14108, N_2 , без обработки	21	0.25	100
	МКА14108, N_2 , с обработкой	100	0.11	1.8
	МКА14108, Ar, без обработки	33	0.24	63.4
	МКА14108, Ar, с обработкой	100	0.9	9.5
5 В - 10 мА, 100 Гц, 10^6 срабатываний	МКА-14103	100	0.17	0.11
	МКА14108, N_2 , без обработки	27	0.35	22.7
	МКА14108, N_2 , с обработкой	100	0.18	2.25
	МКА14108, Ar, без обработки	60	0.47	28.4
	МКА14108, Ar, с обработкой	54	0.66	19.5
20 В - 0.5 А, 50 Гц, $5 \cdot 10^6$ срабатываний	МКА-14103	38	0.16	40
	МКА14108, N_2 , без обработки	47	0.31	0.11
	МКА14108, N_2 , с обработкой	87	0.26	0.13
	МКА14108, Ar, без обработки	53	0.4	0.1
	МКА14108, Ar, с обработкой	73	0.65	0.15
24 В - 400 мА, 50 Гц, $5 \cdot 10^5$ срабатываний	МКА-14103	100	0.13	0.5
	МКА14108, N_2 , без обработки	100	0.29	0.11
	МКА14108, N_2 , с обработкой	100	0.17	0.13
	МКА14108, Ar, без обработки	93	0.3	0.12
	МКА14108, Ar, с обработкой	100	0.51	0.12

Окончание таблицы

36 В - 15 МА, 50 Гц, $5 \cdot 10^6$ срабаты- ваний	МКА-14103	25	0.2	8.7
	МКА14108, N_2 , без обработки	53	0.49	0.34
	МКА14108, N_2 , с обра- боткой	93	0.11	0.25
	МКА14108, Ar, без обра- ботки	20	0.28	0.47
	МКА14108, Ar, с обра- боткой	60	0.46	9
50 В - 50 МА, 50 Гц, $5 \cdot 10^5$ срабаты- ваний	МКА-14103	100	0.14	0.22
	МКА14108, N_2 , без обработки	100	0.38	0.25
	МКА14108, N_2 , с обра- боткой	100	0.16	0.31
	МКА14108, Ar, без обра- ботки	100	0.65	0.22
	МКА14108, Ar, с обра- боткой	100	0.21	0.26
100 В - 100 МА, 50 Гц, $5 \cdot 10^5$ срабаты- ваний	МКА-14103	2	0.17	0.19
	МКА14108, N_2 , без обработки	100	0.27	0.23
	МКА14108, N_2 , с обра- боткой	100	0.19	0.14
	МКА14108, Ar, без обра- ботки	100	0.39	0.21
	МКА14108, Ar, с обра- боткой	100	0.22	0.16

Для выяснения причин этого роста были проведены испытания опытных образцов герконов и серийных приборов без нагрузки (на холостом ходу). Количество коммутаций изменялось поэтапно: 0, 10^4 , 10^5 , 10^6 , 10^7 соударений. На каждом этапе испытаний герконов измерялась величина R (рисунок 1). Изменения морфологии поверхности контактов в зависимости от количества коммутаций изучались в металлографическом микроскопе (рисунок 2).

При количестве коммутаций 10^4 на поверхности контактов герконов без специальных покрытий, независимо от состава газового наполнения, в области контактирования появляются черно-коричневые пятна. Это продукты термического разложения полимерных пленок, образующихся в процессе коммутаций из адсорбированных на поверхности контактов углерода, кислорода и водорода.

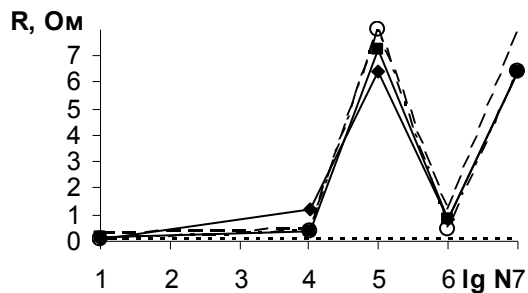


Рисунок 1 – Зависимость сопротивления геркона R от количества срабатываний N на холостом ходу,

--- МКА-14103; —■— МКА-14108, азот, без НВО; --- МКА-14108, аргон, без НВО; —●— МКА-14108, аргон, после НВО (НВО – низковольтная обработка)

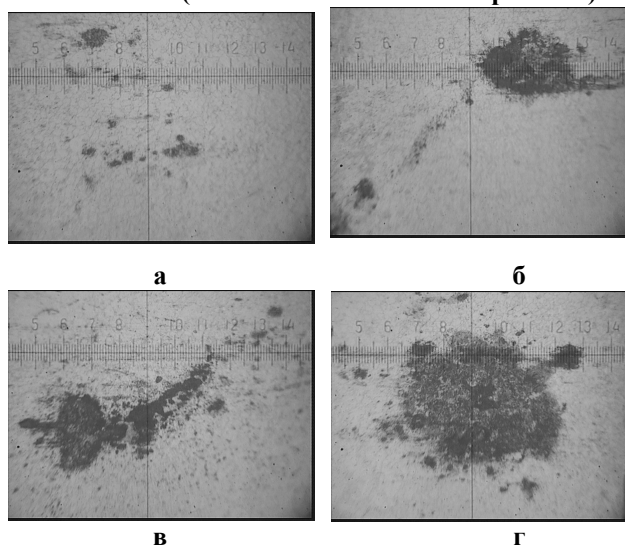


Рисунок 2 – Поверхности контактов герконов МКА-14108 после N коммутаций на холостом ходу, где N: а - 10^4 ; б - 10^5 ; в - 10^6 ; г - 10^7 . Увеличение 300

Основным строительным материалом пленок является углерод [10]. Из-за сложного рельефа поверхности после штамповки (рисунок 3) углеводородные соединения плохо удаляются растворителями, а отжиг в азоте, как известно, углерод не удаляет.

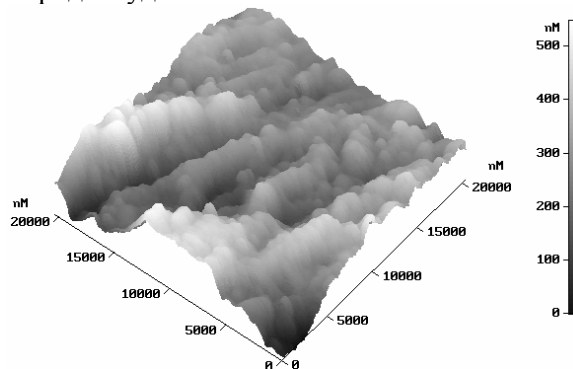


Рисунок 3 – Трехмерное АСМ-изображение участка поверхности пермаллоевой контакт-детали после штамповки со следами волочения исходной проволоки [11]

С увеличением количества коммутаций до 10^5 размер и степень почернения этих пятен увеличиваются, и синхронно с этим процессом возрастает R . В диапазоне $10^5 - 10^6$ наблюдаются разрушение полимерных пленок и снижение R . При дальнейшем наращивании числа коммутаций (вплоть до 10^7) вместо разрушенных соударениями пленок начинают появляться новые полимерные покрытия, в результате чего R опять начинает увеличиваться.

На поверхности контактов герконов с золото-рутениевыми покрытиями в процессе коммутаций полимерные покрытия не образуются, а R практически не меняется (рисунок 1). Однако в тех случаях, когда в области контактирования нарушена сплошность покрытия (рисунок 4), там так же, как и у контактов герконов без покрытия, образуются полимерные пленки, и наблюдается в этой связи рост R .

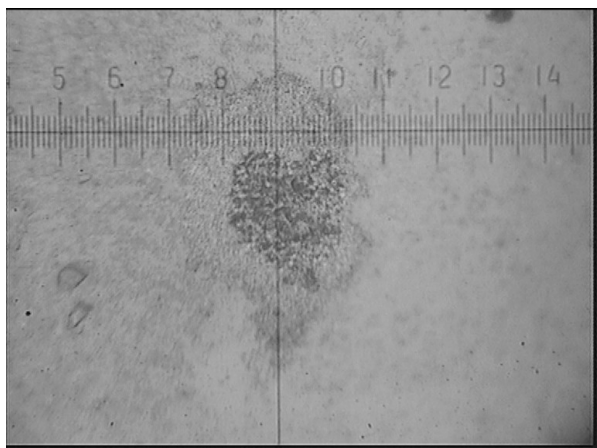


Рисунок 4 – Вид контактирующей поверхности геркона с гальваническим покрытием, обработанного методом автоколебаний, после коммутаций на холостом ходу (10^7 коммутаций). Сопротивление 1.2 Ом, увеличение 300

Следовательно, стабильность R при коммутациях у герконов со специальными покрытиями связана с экранировкой углеводородных загрязнений подложки золото-рутениевым покрытием.

Необходимо отметить, что после удаления углеводородной пленки с поверхности пермалловых контактов с помощью искрового течеискателя «Тесла» и продолжения коммутаций пленки не образуются, а R при этом практически не меняется и не превышает величину 0.1 Ом.

Таким образом, можно предположить, что пермаллой так же, как и родий [12], является активным абсорбентом. Он абсорбирует примеси, содержащиеся в воздухе, а механическая энергия соприкосновения контактов вызывает полимеризацию и образование полимера. В ходе соприкосновений контактов полимер разрушается, и его частицы рассеиваются. Из-за присутствия

между контактами частиц полимера контактное сопротивление становится нестабильным.

После многих экспериментов для контактов из родия был изобретен метод поверхностной дезактивации [12].

Согласно ему контактные детали подвергаются температурному воздействию ($t = 450$ °С) в атмосфере кислорода. В основе механизма процесса лежит тот факт, что органические примеси, абсорбированные поверхностью, выжигаются, а на поверхности образуется оксидная пленка (Rh_2O_3), которая препятствует повторной абсорбции. Контакты герконов из пермаллоя так же, как в случае родиевых контактов, необходимо, во избежание негативного влияния на работу геркона эффекта полимеризации, пассивировать. Однако окислы железа рыхлые и поэтому не могут обеспечить требуемый уровень дезактивации контактов. Поэтому метод пассивации поверхности [12], разработанный для родия и основанный на использовании процесса окисления, для железо-никелевых сплавов, неприменим.

Для решения этой проблемы, после многочисленных исследований, был разработан принципиально новый технологический процесс модификации контактирующих поверхностей магнитоуправляемых контактов (МК).

Он состоит в том, что после заварки контактных пружин в наполненный газом стеклянный баллон через МК, находящиеся в разомкнутом состоянии, пропускают импульсы тока, которые и вызывают формирование в приповерхностной области МК (согласно результатам послойного оже-анализа) наноразмерных азотированных слоев (рисунок 5) с заданными контактными свойствами (рисунок 6).

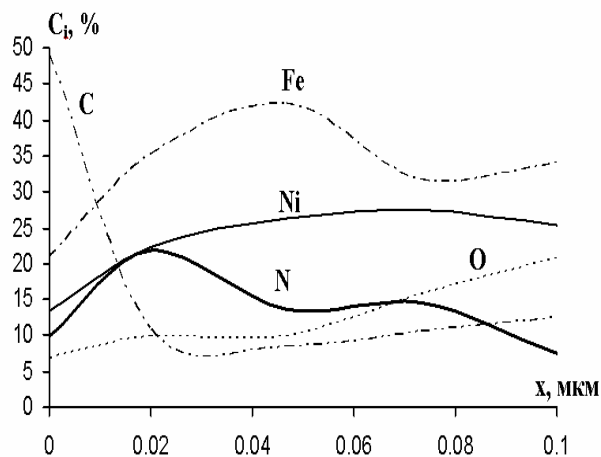


Рисунок 5 – Распределение элементов по глубине контакт-детали геркона после ИПО высоковольтными импульсными разрядами

В результате проведенных работ удалось обеспечить такое электрофизическое условие

разряда, при котором за счет необходимого сочетания нитридного и диффузионного слоев, которые вырастают в основной материал, обеспечивается оптимизация свойств контактной поверхности. При ИПО высоковольтными импульсными разрядами в приповерхностной области контактов формируются коррозионно- и эрозионно-устойчивые наноразмерные азотированные слои с достаточно высокой электропроводностью, что позволило решить проблему пассивации и отказаться от применения в герконах специальных покрытий из драгоценных металлов, изготовленных гальваническим путем.

работанные техпроцесс, установку для его реализации [4] и сам геркон МКА 14108 к промышленному освоению.

Заключение. Таким образом, применение для модификации поверхности МК ионно-плазменной технологии позволяет формировать в приповерхностной области пермаллоевых контактов наноразмерные азотированные слои с контактными свойствами, идентичными золоторутениевым покрытиям, уменьшить себестоимость разработанного на основе этой технологии нового геркона МКА-14108 почти в 2 раза по сравнению с его ближайшим аналогом, прибором МКА-14103 [13].

Библиографический список

1. Таблицы физических величин: справочник / Под ред. акад. И.К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. – С. 427.

2. Разумихин М.А. Эрозионная устойчивость маломощных контактов. – М.–Л.: Энергия, 1964. – 80 с.

3. Авторское свидетельство № 624307 СССР. Устройство для тренировки герконов / Удалов В.Ф., Игнатов А.И., Ермаков В.М.

4. Птицын В.Э. К теории пробоя вакуумной электроизоляции // Письма в ЖЭТФ. 1992. – Т. 55. – Вып. 6. – С. 325–339.

5. Зельцер И.А., Кукушкин С.А., Саблин В.А., Моос Е.Н. Образование неравновесных состояний при вакуумном пробое // Тезисы докладов IX Международного семинара «Структурные основы модификации материалов методами нетрадиционных технологий», (МНТ-IX). – Обнинск: 2007. – С. 38.

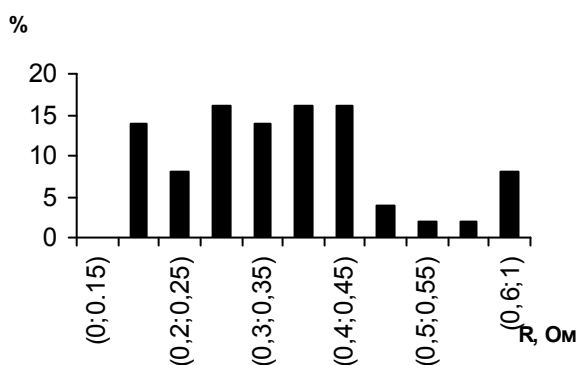
6. Зельцер И.А., Моос Е.Н., Саблин В.А., Трунин Е.Б. Синергетические эффекты при вакуумном пробое в герконах // Сборник трудов второй международной научно-практической конференции «Магнитоуправляемые контакты (герконы) и изделия на их основе», под ред. С.М. Карабанова. – Рязань: Полиграф, 2009. – С. 111–122.

7. 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», под ред. С.М. Карабанова. – Рязань: Полиграф, 2009. – С. 169–173.

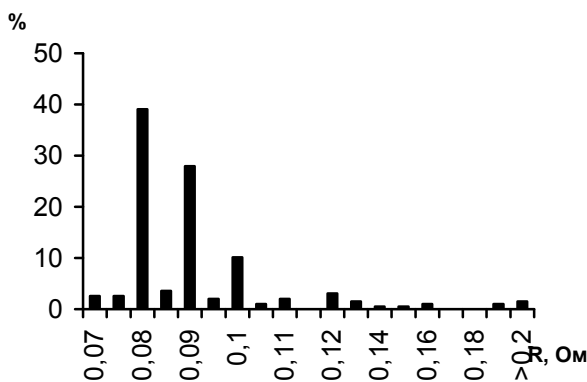
8. Лахтин Ю.М. Теория и технология азотирования. – М.: Металлургия, 1991. – 319 с.

9. Лященко Б.А., Мироненко В.И., Радько О.В., Бобьрь С.А. Особенности азотирования стали 30ХГСА в пульсирующем разряде // Вісник Чекаського національного університету. 2007. – Вип. 117. – Сер. «Фізико-математичні науки». – С. 107–110.

10. 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», под



а



б

Рисунок 6 – Распределение сопротивлений герконов МКА-14108 (без гальванопокрытия) до (а) и после (б) модификации поверхности на установке для ИПО высоковольтными импульсными разрядами

Для осуществления процесса ИПО изготовлен опытный образец установки [7]. Разработанный процесс модификации был опробован при промышленном изготовлении принципиально нового образца геркона с наноструктурированными контактными поверхностями типа МКА-14108. Положительные результаты коммутационных испытаний позволили рекомендовать раз-

ред. С.М. Карбанова. – Рязань: Полиграф, 2009. – С. 84–87.

11. Гололобов Г.П., Арефьев А.С., Трегулов В.Р., Уточкин И.Г., Киреева О.В. Исследование поверхности магнитоуправляемых контактов методом атомно-силовой микроскопии // Вестник РГРТА. 2003. – Вып. 13. – С. 66–69.

12. Patent № 3813508 United State. Reed switch / Yokokawa Toshiki, Chihiro Kawakita.

13. Майзельс Р.М. Герконы. Перспективы применения. Новые разработки ОАО "РЗМКП" // Сборник трудов второй международной научно-практической конференции «Магнитоуправляемые контакты (герконы) и изделия на их основе», под ред. С.М. Карбанова. – Рязань: Полиграф, 2009. – С. 3–14.