# К.А. Арушанов\*, И.А. Зельцер\*\*, В.М. Ермаков\*\*, Е.Б. Трунин\*\* \* 390005, Россия, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1 ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет» \*\* 390027, Россия, г. Рязань, ул. Новая, 51B, ОАО «РЗМКП»

Проведен анализ факторов, влияющих на напряжение пробоя вакуумной изоляции геркона. Предложены методы и технологические приемы повышения напряжения пробоя и других технических характеристик высоковольтных вакуумных герконов.

Factors which influence on the breakdown voltage of vacuum insulation of reed switch were analyzed. Methods and processing technologies of increasing the breakdown voltage and of performance improvement of high-voltage vacuum reed switches have been offered.

# 1. Введение

Явление вакуумного пробоя изучается около ста лет, однако, до настоящего времени теория вакуумного пробоя находится в стадии построения ввиду сложности и многообразия процессов, происходящих в вакуумном межэлектродном промежутке, на поверхности и в объеме самих электродов при увеличении напряжения между ними. Существующие теоретические модели [1 - 4] противоречивы и не могут однозначно объяснить целый ряд экспериментальных результатов. Это обстоятельство негативно сказывается на решении целого ряда прикладных задач, например, на разработке методов повышения электрической прочности вакуумной изоляции высоковольтных приборов, к которым относятся магнитоуправляемые герметизированные контакты (герконы).

Известны герконы [5], в которых для повышения пробивного напряжения производится вакуумирование. У вакуумных герконов пробивное напряжение достигает величины до 10 кВ и более. К таким герконам относится прибор МКА-40142, имеющий электрическую прочность вакуумной изоляции не менее 10 кВ. Давление остаточных газов в этих герконах после герметизации может составлять, по нашим оценкам, 1–10<sup>-1</sup> Па.

В процессе работы контакты геркона и стеклянный баллон нагреваются, происходит газовыделение из всех материалов (стеклобаллона, контактного покрытия и электродов), давление возрастает. При хранении, вследствие технологических особенностей процессов обезгаживания и откачки, также происходит газовыделение. Значение пробивного напряжения в этих случаях может снижаться.

Целью данной работы является рассмотрение факторов, влияющих на напряжение пробоя, и технологических приемов повышения электрической прочности вакуумной изоляции высоковольтных приборов, создание необходимых условий для сохранения и улучшения вакуума, повышение стабильности работы геркона в разных режимах (в частности повышение напряжения пробоя) в течение длительного времени.

# 2. Объекты и методы исследования

## 2.1. Объекты исследования

**МКА-40142 с Мо покрытием.** В качестве образцов использовались герметизированные магнитоуправляемые контакты (герконы) МКА-40142 (рис. 1, табл. 1) [5]. Контакт-детали герконов изготовлены из пермаллоя и покрыты молибденом толщиной 12 – 14 мкм методом вакуумного плазменно-дугового напыления [6].

Герконы обезгаживались, откачивались и герметизировались при давлении  $3 \times 10^{-4}$  Па. После вакуумной герметизации штенгеля в каждом герконе измерялось напряжение пробоя, затем производилась его тренировка и повторное измерение напряжения пробоя.



Рис. 1. Конструкция геркона МКА-40142 [5]

Таблица 1

	50 Вт при коммутируемом напряжении до 1000 В				
максимальная коммутируемая мощность	10 Вт при коммутируемом напряжении выше 1000 В				
Напряжение, В	5000				
Ток (ком.), А	3,0				
МДС срабатывания, А	80180				
МДС отпускания, А, не менее	30				
Контактное сопротивление, Ом, не более	0,1				
Электрическая прочность изоляции, В постоянного тока, не менее	5000 - 10000				
Сопротивление изоляции, Ом, не менее	$1 \cdot 10^{11}$				
Время срабатывания, мс, не более	3,0				
Время отпускания, мс, не более	2,0				
Емкость, пФ, не более	1,0				
Резонансная частота, Гц, не менее	1000				
Диапазон рабочих температур, °С	-60+125				
Повышенная влажность при 35 °С, %, не более	98				

Основные технические характеристики геркона МКА-40142 [7]

**МКА-40142 с Мо-Ті покрытием.** Опытные образцы высоковольтных вакуумных герконов конструктивно выполнены на базе серийных приборов МКА-40142 по технологии [5]. Основная отличительная особенность конструкции этих герконов, по сравнению с серийными приборами, заключается в том, что на поверхность дугоустойчивого молибденового покрытия методом вакуумного плазменно-дугового напыления дополнительно нанесено специальное покрытие из геттерирующего металла – титана. Предлагаемая конструкция представлена на рис. 2.



Рис. 2. Конструкция геркона МКА-40142 с Мо-Ті покрытием: 1 – стеклянный баллон, 2, 3 – контакт-детали, 4 – область перекрытия, 5 – ферромагнитная матрица (пермаллой), 6 – молибденовое покрытие, 7 – титановая пленка (штенгель на рисунке не показан)

Наличие на контактирующей поверхности контакт-деталей металла-геттера позволяет в процессе работы геркона распылять этот металл и получать распыляемую пленку на внутренней стенке стеклянного корпуса. Постоянно обновляемая в процессе работы геркона пленка из металла-геттера обеспечивает высокую стабильность при длительной работе герконов.

#### 2.2. Методы исследования

Исследовалось влияние на значение напряжения пробоя длин перекрытия и межконтактного зазора, топографии поверхности и материала покрытия, режимов откачки и обезгаживания.

Анализ топографии поверхности контактов осуществлялся на воздухе с помощью атомно-силового микроскопа (зондовой нанолаборатории (ЗНЛ) NTEGRA производства компании NT-MDT, Зеленоград, Москва, Россия). Использовались Si-кантилеверы марки NSG10/W<sub>2</sub>C, с твердым токопроводящим покрытием W<sub>2</sub>C толщиной 30 нм, с работой выхода  $e\phi_p = 4.902$  эВ.

Длины перекрытия и растворы контактов (кратчайшие расстояния между контактирующими поверхностями) измерялись с помощью оптического микроскопа.

Полученные при этом данные сопоставлялись с результатами измерения ряда характеристик, в частности, напряжения пробоя. Подробное описание процессов измерения параметров и испытаний приведено в работе [5].

## 3. Результаты исследований и их анализ

#### 3.1. Влияние геттерирующего покрытия

Работа геркона с геттерирующим контактным покрытием происходит следующим образом. При наложении магнитного поля контакты замыкаются, и геркон проводит электрический ток. Сформированные на поверхности контактов покрытия, содержащие титановый геттер (температура газопоглощения от 20 °C до 196 °C; температура распыления 1300 °C – 2000 °C), контактируют друг с другом. В процессе замыкания и размыкания контактов геркона между ними возникают микродуги, и материал геттера (который имеет высокое давление паров при температуре дуги) распыляется в соответствии с законами геометрической оптики на стенки корпуса. В результате из материала геттера создается пленка в виде кольца ближе к месту контакта электродов.

Распыление геттера можно производить также в процессе его изготовления во время тренировки геркона. Остаточные газы поглощаются, и напряжение пробоя определяется в основном только геометрией электродов и расстоянием между ними.

Была изготовлена партия из 120 герконов МКА-40142 с Мо-Ті покрытием. Толщины слоев: 12 – 14 мкм (Мо), 1 – 1,5 мкм (Ті).

Интервалы времени между окончанием операции «Заварка» (З) и измерениями первого, второго и третьего пробоев: 1 день – 14 дней – 60 дней.

Каждое измерение напряжения пробоя производились до и после тренировки, которая проходила при подаче на контакты геркона постоянного напряжения величиной 13 кВ в течение 15 с.

Соответствующие гистограммы распределений герконов по напряжениям пробоя до и после тренировок представлены на рис. 3.





Рис. 3. Влияние тренировки на напряжение пробоя ( Uпр.1 до трен. и Uпр.1 после трен., Uпр.2 до трен. и Uпр.2 после трен., Uпр.3 до трен. и Uпр.3 после трен. – напряжения первого, второго, третьего пробоев до и после тренировки, соответственно). Количество герконов в партии – 120 шт.

Из рассмотрения гистограмм на рис. З видно, что благодаря геттеру и проведенной тренировке напряжение пробоя у большинства герконов остается достаточно высоким (14 -16 кВ) в течение длительного времени.

Исследовались также распределения герконов по длине перекрытия и раствору контактов. Результаты измерений представлены на рис. 4 и 5.



а

Зазор Мо+Ті Uпр3 после тр. (16 кВ)



b

Рис. 4. Распределение герконов по зазорам (растворам контактов)







Рис. 5. Распределение герконов по длине перекрытия

Судя по гистограммам, распределений герконов по зазору (рис. 4, a) и длине перекрытия (рис. 5, a), около 50 % из 120 герконов имеют раствор контактов 250 мкм, длину перекрытия 750 – 800 мкм, соответственно. Такие же тренды имеют распределения 16 кВ герконов по раствору контактов (рис. 4, b) и длине перекрытия (рис. 5, b) после третьего пробоя и тренировки.

Чтобы исключить влияние на напряжение пробоя дисперсии значений зазора и длин перекрытия, исследована группа из 24 герконов с зазором 240 ± 10 мкм и длиной перекрытия 750 ± 50 мкм. По результатам измерений построены гистограммы распределений герконов по напряжениям пробоя (рис. 6).





Рис. 6. Влияние тренировки на напряжение пробоя. Количество герконов в партии – 24 шт., раствор контактов 240 ± 10 мкм, длина перекрытия 750 ± 50 мкм

Сравнительный анализ полученных гистограмм с зависимостями, изображенными на рис. 3, показывает, что с увеличением количества тренировок, зависимости распределений числа герконов по напряжению пробоя для широкой и узкой (по растворам контактов и длине перекрытия) групп имеют одинаковые тренды развития.

В процессе работы одновременно происходят выделение газов из деталей геркона и их поглощение материалом распыляемого покрытия. Так, отрицательное влияние процесса газовыделения на работу геркона (на электрическую прочность его вакуумной изоляции) нивелируется геттерирующими свойствами контактного покрытия.

Таким образом, у экспериментальных герконов, во многом благодаря наличию геттерирующего покрытия из титана, наблюдается повышение напряжения пробоя и увеличение выхода годных (по значению напряжения пробоя) герконов, а также уменьшение негативного влияния газовыделения на электрическую прочность вакуумной изоляции при хранении и эксплуатации.

## 3.2. Влияние рельефа поверхности

Основным механизмом, вызывающим электрический пробой межконтактного зазора в вакуумных герконах, является автоэлектронная эмиссия с микровыступов на отрицательном электроде (катоде) [1-3]. Однако есть и альтернативная теория вакуумного пробоя [4], рассматривающая как инициирующий фактор нарушения вакуумной электроизоляции не полевую эмиссию, а газовый разряд в порах (дефектах) поверхности электродов. Исследованные автором [4] закономерности этого разряда объясняют характеристики вакуумной электроизоляции и изменяют сложившиеся представления о выборе материалов электродов и их предварительной подготовке.

Поэтому на электрическую прочность значительное влияние оказывают шероховатость, неоднородность и структура поверхности покрытия.

Профилограммы и рельеф используемых в герконах молибденовых покрытий (без использования геттера), полученные с помощью атомно-силового микроскопа, представлены на рис.7 – 10, а статистические параметры приведены в табл. 2.



Рис. 7. 2D-изображение поверхности (А), профилограмма поверхности вдоль линии 170 (В), 3D-изображение поверхности (С), 30х30 мкм, напряжение пробоя U<12 кВ



Рис. 8. 2D-изображение поверхности (А), профилограмма поверхности вдоль линии 91 (В), 3D-изображение поверхности (С), 2х2 мкм, напряжение пробоя U<12 кВ



Рис. 9. 2D-изображение поверхности (А), профилограмма поверхности вдоль линии 138 (В), 3D-изображение поверхности (С), 25х25 мкм, напряжение пробоя U>12 кВ



Рис. 10. 2D-изображение поверхности (А), профилограмма поверхности вдоль линии 68 (В), 3D-изображение поверхности (С), 2х2 мкм, напряжение пробоя U>12 кВ

Таблица 2

Статистические п	апаметп	ы репьед	на пове	пхности	контактов	изоб	паженных	на r	лис	7 - 1	0
	apamerp	ы рельсч	Ja nobe	рлпости	KUIIIakiub,	11300	раженных	map	JHC.	/ - 1	U

Напряжение пробоя	U>12ĸB				U<12ĸB				
Область анализа	2x2 мв	ME	25x	25 мкм	2х2 мв	M	30x30 мкм		
	Вся поверхность	Вдоль линии 68	Вся поверхность	Вдоль линии 138	Вся поверхность	Вдоль линии 133	Вся поверхность	Вдоль линии 170	
Число точек равное N <sub>x</sub> *N <sub>y</sub>	65536	256	2002	256	65536	256	3611	256	
Макс. высота, нм	91.5354	90.4175	349.685	416.815	111.656	96.876	450.97	473.947	
Мин. высота, нм	0	26.9513	119.48	96.1309	0	30.1185	110.724	56.3868	
Размах высот, нм	91.5354	63.4662	230.205	320.684	111.656	66.7575	340.246	417.56	
R₂лараметр выражает шероховатость поверхности по выбранным пяти макс. высотам и впадинам	45.7925	58.6658	226.932	256.324	55.8714	60.6283	280.996	273.569	
Ср. высота, нм	46.3537	46.3818	228.333	239.788	52.6754	52.3106	255.237	272.433	
Ср. арифм. шероховатость , нм	6.83149	10.9848	30.0224	62.9619	9.29197	9.14344	56.7825	70.918	
Ср. кв. шероховатость , нм	9.24846	14.2285	39.6932	75.045	12.4704	12.1212	70.6734	84.7017	

Применение для исследования поверхности АСМ-метода позволило получить не только структуру контактного покрытия, но и определить геометрические размеры микровыступов.

Для покрытия герконов с напряжением пробоя больше и равным 12 кВ высота микровыступов составила 200-250 нм при средней квадратичной шероховатости ≈ 40 нм, а для покрытия герконов с напряжением пробоя меньше 12 кВ значения высоты лежат в диапазоне 200-300 нм при средней квадратичной шероховатости ≈ 71 нм. Согласно обеим теориям [1-4] вакуумного пробоя, его вероятность возрастает с увеличением шероховатости (авторы 1-й теории [1-3] считают фактором, инициирующим нарушения вакуумной электроизоляции, полевую эмиссию, а 2-й [4] – газовый разряд в порах (дефектах) поверхности электродов).

Таким образом, полученные экспериментальные данные согласуются с теоретическими представлениями и могут быть использованы при конструировании герконов.

#### 3.3. Влияние длины перекрытия на напряжение пробоя

Для исследования влияния длины перекрытия на напряжение пробоя были изготовлены 3 партии (по 40 шт. в каждой) герконов МКА-40142 (покрытие – Мо без геттера) с длиной перекрытия 0,4; 0,7; 1 мм. Раствор контактов – 0,2 мм. Откачка, обезгаживание, герметизация всех трех партий производилась одновременно. На другой день, после вакуумной герметизации штенгеля, в каждом герконе измерялось напряжение пробоя, затем через 1-2 недели производилась его тренировка и повторное измерение напряжения пробоя. Третья тренировка и измерение пробоя проводились спустя месяц после герметизации штенгеля. Результаты измерений напряжения третьего пробоя магнитодвижущей силы срабатывания для групп герконов с длиной перекрытия: 0,44 0,7; 1 мм представлены в виде гистограмм (рис. 11) и графиков (рис. 12).



Рис. 11. Распределение герконов по длине перекрытия с напряжениями пробоев больше или равными (A) и меньше (B) 12 кВ



Рис. 12. Зависимости МДС срабатывания Fcpa6 (А) напряжения пробоя Uпp (В) от длины перекрытия L

Результаты, представленные на рис. 11-12, позволяют выбрать значения длины перекрытия, обеспечивающие заданную электрическую прочность и чувствительность.

Таким образом, при выборе конструкции предпочтение следует отдавать герконам с длиной перекрытия 0,4 -0,7 мм.

# **3.4.** Влияние температурных режимов обезгаживания и герметизации при откачке на напряжение пробоя

В качестве образцов использовались герметизированные магнитоуправляемые контакты (герконы) МКА-40142 [5] в количестве 120 шт. Контакт-детали герконов изготовлены из пермаллоя и покрыты молибденом толщиной 6–8 мкм методом вакуумного плазменно-дугового напыления [6].

Герконы в процессе изготовления обезгаживались, откачивались и герметизировались с помощью универсального вакуумного поста УВН-70А-1. После вакуумной герметизации штенгеля в каждом герконе измерялось напряжение пробоя, затем производилась его тренировка и повторное измерение напряжения пробоя.

Результаты измерений напряжения пробоя до и после тренировки представлены на рис. 13.



Рис. 13. Распределения количества герконов N по напряжениям пробоя Uпр до (1) и после тренировки (2) при различных температурах обезгаживания, °C: а) 420; b) 440; c) 460. Количество герконов в каждой партии (a, b, c) – 120 шт.

Из рассмотрения графиков, приведенных на рис. 13, можно сделать некоторые выводы.

Во-первых, у большинства герконов после откачки и обезгаживания напряжение пробоя имеет величину около 6 кВ, а после тренировки может достигать приблизительно 14 кВ (рис. 13 a,b).

Во-вторых, по приведенным зависимостям можно определить оптимальный режим обезгаживания при откачке. В данном случае это откачка, производимая при температуре отжига 440 °C.

#### 4. Заключение

Применение методов и технологических приемов повышения напряжения пробоя, рассмотренных в настоящей работе, будет способствовать как улучшению технических характеристик выпускаемых в настоящее время высоковольтных герконов, так и разработке новых вакуумных коммутаторов.

#### Литература

- 1. Тарасова Л.В. Современные представления о механизме электрического пробоя в высоком вакууме. // УФН. 1956. Т. 58. Вып. 2. С. 321.
- 2. Сливков И.Н., Михайлов В.И., Сидоров Н.И., Настюха А.И. Процессы при высоком напряжении в вакууме. М.: Энергоатомиздат, 1966. 320 с.
- Птицын В.Э. К теории пробоя вакуумной электроизоляции. // Письма в ЖЭТФ. 1992. Т. 55. Вып. 6. С. 325.

- 4. Татаринова Н.В. Вакуумная электроизоляция. // Вакуумная техника и технология. 2003. Т. 13. № 1. С. 3.
- 5. Карабанов С.М., Майзельс Р.М., Шоффа В.Н. Магнитоуправляемые герметизированные контакты (герконы) и изделия на их основе. М.: Интеллект, 2011. 408 с.
- Ананьин В.В. Новые контактные покрытия на базе молибдена и вольфрама (напыление). // Сборник трудов первой международной научно-практической конференции «Магнитоуправляемые контакты (герконы) и изделия на их основе», 11– 14 октября 2005. / Под ред. д.т.н. С. М. Карабанова. - Рязань: Поверенный, 2006. – С. 102.
- Майзельс Р.М. Разработки новых герконов. Перспективы развития. // Сборник трудов второй международной научно-практической конференции «Магнитоуправляемые контакты (герконы) и изделия на их основе», 1–3 октября 2008. / Под ред. д.т.н. С.М. Карабанова. – Рязань: Полиграф, 2009. – С. 8.