

# ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ ВАКУУМНЫХ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ МАГНИТОУПРАВЛЯЕМЫХ КОНТАКТОВ

А.С. Иваников, к.т.н., В.А. Коротченко, д.т.н, В.В. Орешкин, к.т.н.  
390005, ул. Гагарина 59/1, г. Рязань, Россия,  
Рязанский государственный радиотехнический университет

*В работе приведены результаты исследования влияния различных факторов на электрическую прочность вакуумных герконов МКА-52141 и МКА-52-142.*

*In the paper, investigation results of the effect of different factors on the electric strength of vacuum reed switches МКА-52141 and МКА-52142 are presented.*

Электрическая прочность является одним из важнейших параметров вакуумных высоковольтных магнитоуправляемых контактов (МК), определяющих их коммутационные возможности и работоспособность. Специфичность МК заключается в том, что их электроды, расположенные в баллоне с очень малым объемом, одновременно являются и магнитопроводом, и контактной группой. Это не позволяет полностью применять к герконам результаты многочисленных исследований вакуумного пробоя в приборах с неподвижной системой электродов.

Объектами исследования в настоящей работе являлись образцы высоковольтных вакуумных магнитоуправляемых контактов МКА-52141, МКА-52142 и выполненные на их основе экспериментальные макеты. В экспериментах использовалась высоковольтная установка типа «Ирис-1» с плавным изменением напряжения в диапазоне 0 – 30 кВ. Ограничительные резисторы варьировались в интервале  $10^6 - 2 \cdot 10^7$  Ом. Значение паразитной емкости не превышало 10 пФ. Электрическая прочность приборов оценивалась по величине напряжения, при котором в межконтактном зазоре в течение минуты фиксировалось 10 – 20 пробоев (электрических микроразрядов). Такой способ оценки электрической прочности выбран на основе экспериментальных данных о частоте пробоев в зависимости от величины напряжения при его ступенчатом увеличении [1]. Исследовались основные группы факторов, способных влиять на электрическую прочность вакуумных высоковольтных МК.

## **Влияние размеров контакт-деталей, промежутка и колбы**

Особенность вакуумных высоковольтных МК заключается в том, что их электродная система определяет не только электрическую прочность, но и чувствительность приборов, оцениваемую по току срабатывания в катушке управления. Кроме того, при высоком напряжении электростатические силы притяжения могут уменьшить величину межконтактного зазора и даже замкнуть электроды без воздействия управляющего магнитного поля. Степень влияния электростатических сил определяется жесткостью контакт-деталей (длиной, шириной и толщиной подвижной части электрода) и площадью перекрытия контакт-деталей в рабочем зазоре. Изменение геометрических размеров электродов ведет к изменению всех габаритных размеров МК и катушки управления. Поэтому при проведении исследований анализировалось влияние на электрическую прочность величины межэлектродного зазора и площади (длины) перекрытия при неизменных размерах контакт-деталей. Результаты исследований представлены в виде зависимостей пробивного напряжения от межэлектродного зазора при различных значениях длины перекрытия для двух типов герконов (рис. 1, 2).

Как следует из рисунков, для герконов МКА-52142 с внутренним диаметром колбы 3,6 мм зависимости пробивного напряжения от величины зазора в диапазоне 0,1 – 1,0 мм линейны при величине перекрытия до 1 мм, а для герконов МКА-52141 – до 0,4 мм. С увеличением перекрытия линейность зависимости нарушается (рис. 2), и рост электрической

прочности с увеличением зазора замедляется. Изменение характера зависимости обусловлено воздействием электростатических сил и увеличением вероятности пробоя с ростом площади перекрытия электродов при значительной шероховатости контактного покрытия.

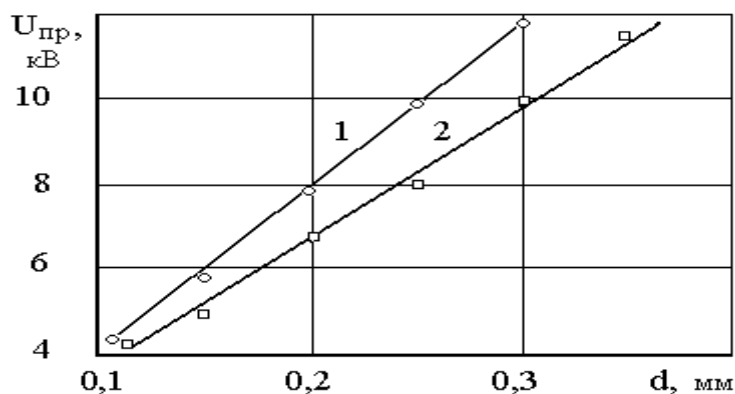


Рис. 1. Зависимости пробивного напряжения от величины зазора в герконах МКА-52141 при двух значениях перекрытия: 1 – 0,6 мм, 2 - 1,0 мм

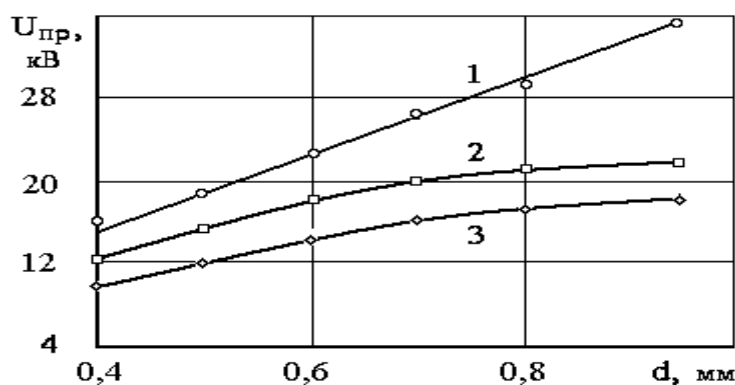


Рис. 2. Зависимости пробивного напряжения от величины зазора в герконах МКА-52142 при трех значениях перекрытия: 1 – 0,4 мм; 2 – 0,6 мм; 3 – 0,8 мм

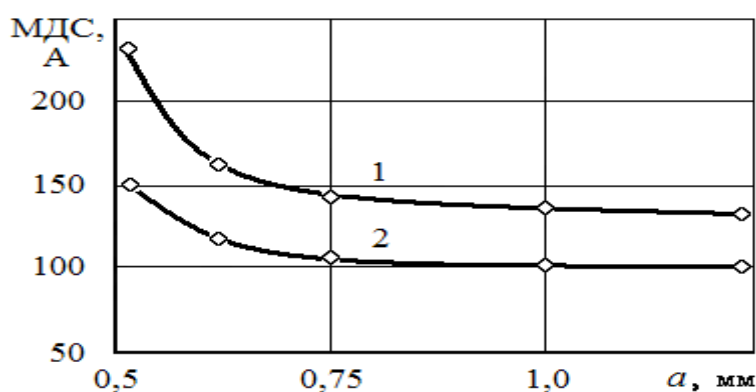


Рис. 3. Зависимости чувствительности геркона МКА-52141 от длины перекрытия при двух значениях межконтактного зазора: 1 – 0,3 мм, 2 – 0,25 мм

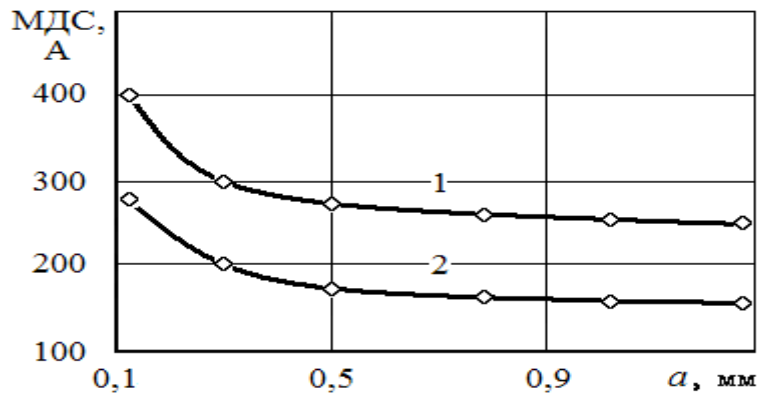


Рис. 4. Зависимости чувствительности геркона МКА-52142 от длины перекрытия центрального зазора при двух значениях межконтактного зазора: 1 – 0,7 мм, 2 – 0,5 мм

Заключение о влиянии электростатических сил подтверждается результатами расчета изгиба электродов МК под действием высокого напряжения, увеличением электрической прочности при импульсных напряжениях ( $\tau \leq 300$  мкс) и появлением в предпробойном токе емкостной составляющей, обусловленной перемещением электродов [1].

Конструкция МК типа МКА-52142 предусматривает наличие трех магнитных зазоров при одном электрическом с подвижной частью из молибдена или титана. Поэтому при выборе значений межэлектродного зазора и перекрытия необходимо учитывать изменение МДС срабатывания. На рис. 3, 4 приведены зависимости данного параметра от зазора и перекрытия. Для одновременного обеспечения высоких значений электрической прочности и чувствительности необходимо полностью или частично разделять электрическую и магнитную цепи, чтобы уменьшить влияние электростатических сил притяжения.

Увеличение диаметра стеклянной колбы до 80 мм и ее длины до 60 мм повышает электрическую прочность на 15 – 20%, но для обеспечения герметичности спаев контакт-деталей со стеклом требует введения операции предварительного остекловывания электродов в месте спаев. Кроме того, резко уменьшается чувствительность приборов.

В совокупности результаты, представленные на рис. 1 – 4, позволяют обосновать выбор значений межконтактного зазора и площади перекрытия, обеспечивающих заданную электрическую прочность и высокую чувствительность вакуумных высоковольтных МК.

#### Влияние давления остаточных газов

Исходное давление в вакуумных МК определяется режимом температурной обработки при откачке и герметизации. Многолетний опыт показал, что обезгаживание на откачном посту при температуре  $\approx 430$  °С в течение не менее 4-х часов и применение ступенчатого режима отпая откачного штенгеля обеспечивают давление остаточных газов в приборах на уровне не более  $10^{-5}$  Торр. Предельное давление, при котором приборы сохраняют работоспособность, составляет  $10^{-3}$  Торр.

Повышение давления до критических значений может происходить в результате выделения газов из стеклянной оболочки и контакт-деталей или за счет натекания через спаи стекла с металлом. Газовыделение существенно проявляется при нагреве оболочки и контакт-деталей в ходе коммутации электрической цепи, в процессе тренировки или в ходе испытаний на электрическую прочность. Однако поток выделяемого газа в этих случаях сорбируется внутренней поверхностью вакуумной оболочки, на которой осаждается пленка распыленного материала контактного покрытия. В условиях хранения МК без подачи высокого напряжения газовыделением материалов можно пренебречь.

Величина предельно допустимой течи через спаи в нормальных условиях хранения была рассчитана по методикам и формулам, приведенным в [2]. Расчет показал, что для вакуумных МК с объемом  $V \approx 4 \cdot 10^{-7}$  м<sup>3</sup> давление остаточных газов увеличивается до  $10^{-3}$  Торр за 1000 суток при скорости натекания газа  $5,58 \cdot 10^{-11}$  л · Торр/с. Столь малый газовый поток не регистрируется с помощью промышленных течеискателей ПТИ-7 и ПТИ-9. Поэтому для прогнозирования срока хранения необходимо применять более чувствительные

методы обнаружения течей. Например, можно использовать квадрупольный масс-спектрометр с предварительной опрессовкой МК в среде гелия или аргона.

### Влияние материалов и методов нанесения контактного покрытия

Основным материалом контактного покрытия в вакуумных высоковольтных МК является вольфрам, наносимый плазменным напылением с последующей «приштамповкой», осаждением из газовой фазы соединений  $WF_6$  и  $W(CO)_6$  и осаждением из дугового разряда в парах вольфрама. Основным механизмом, вызывающим электрический пробой межконтактного зазора в вакуумных герконах, является автоэлектронная эмиссия с микровыступов на отрицательном электроде (катоде) [1]. Поэтому на электрическую прочность значительное влияние оказывают шероховатость, неоднородность и структура поверхности покрытия.

Профилограммы и рельеф используемых в герконах вольфрамовых покрытий, полученные с помощью атомно-силового микроскопа, представлены на рис. 5 – 7.

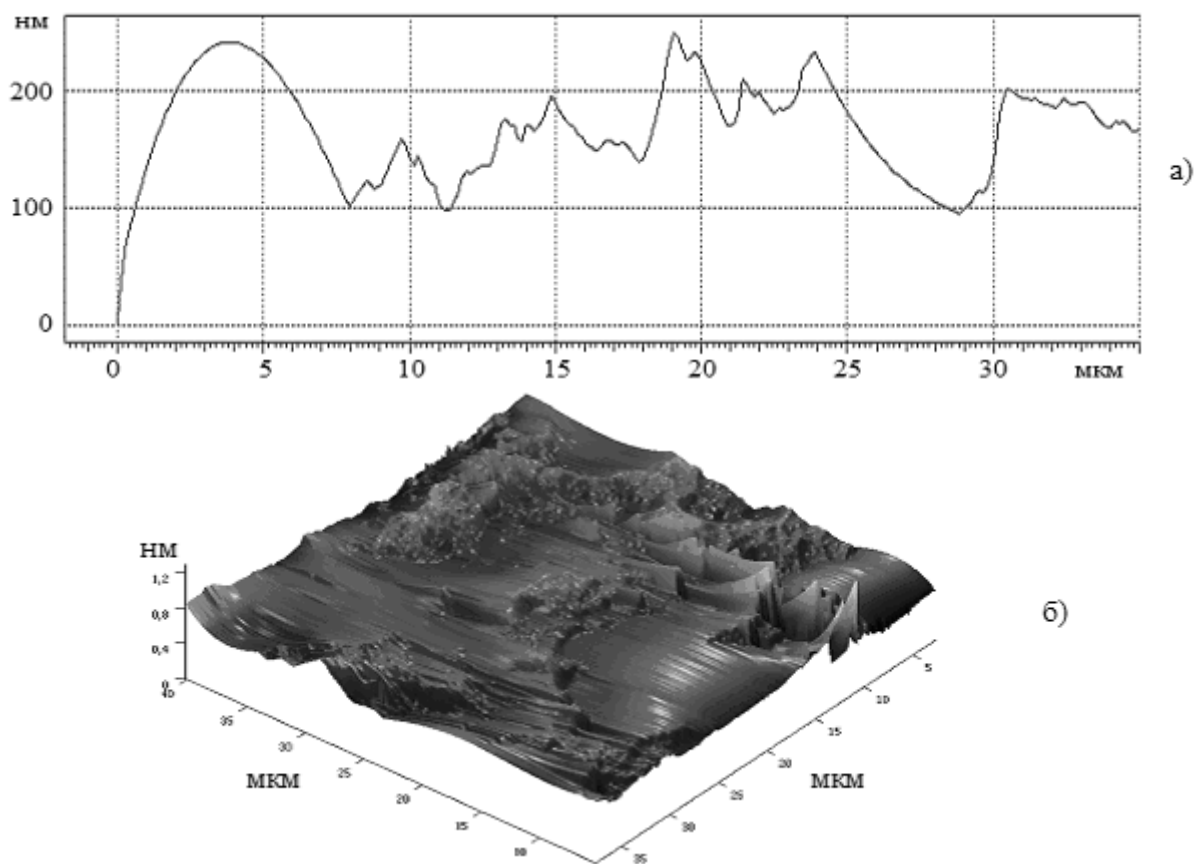
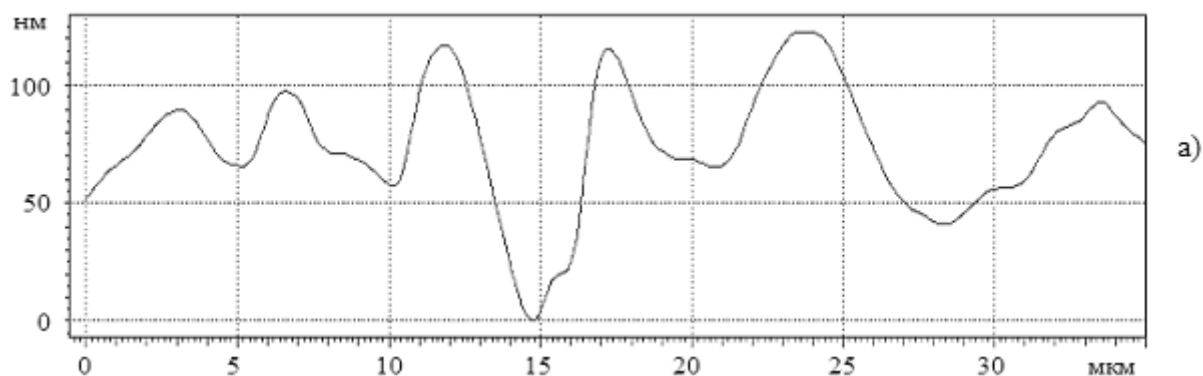


Рис. 5. Профилограмма (а) и общий вид (б) поверхности вольфрамового контактного покрытия, полученного плазменным напылением с «приштамповкой»



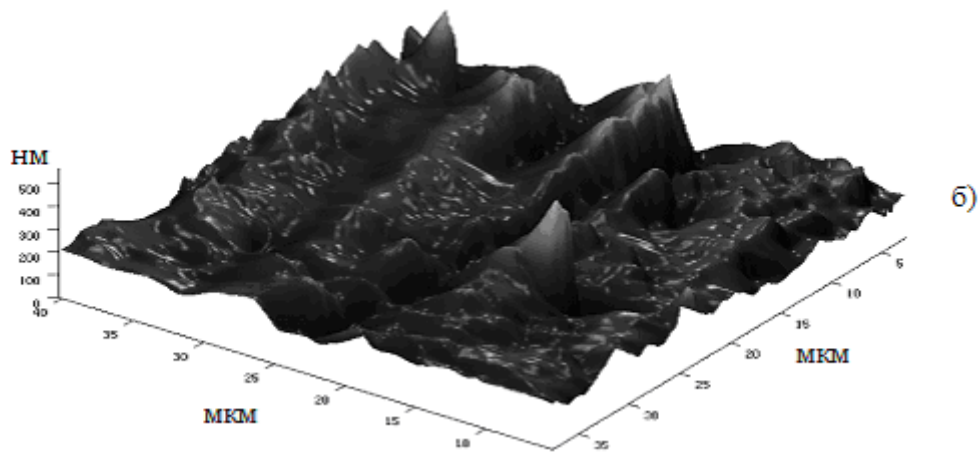


Рис. 6. Профилограмма (а) и общий вид поверхности (б) вольфрамового контактного покрытия, осажденного из газовой фазы соединения  $WF_6$

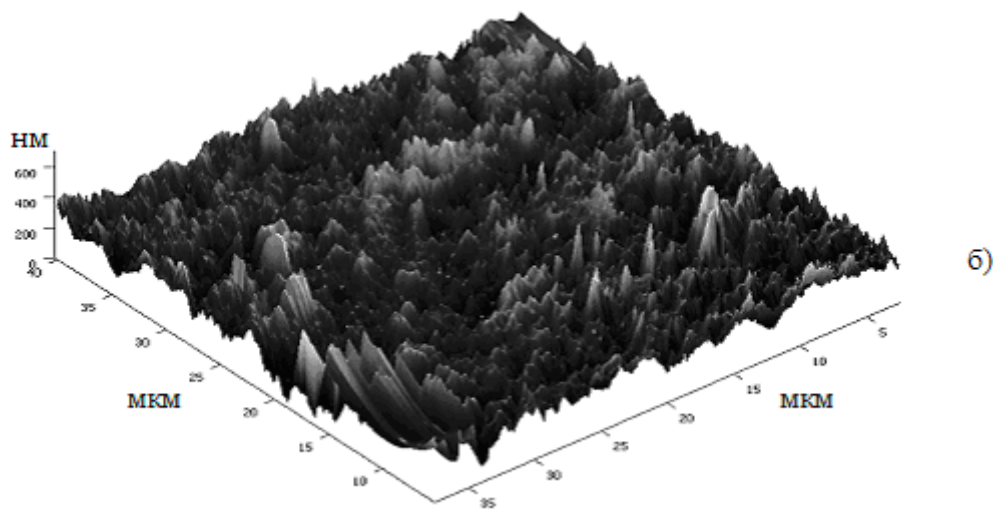
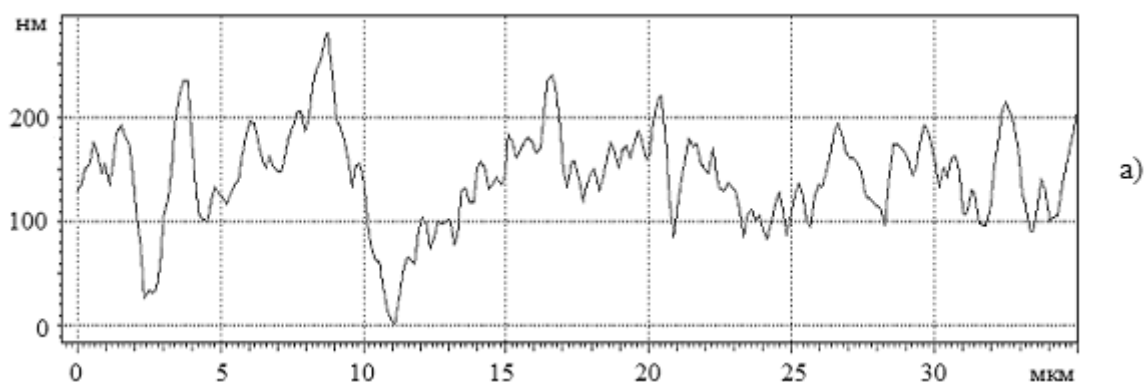


Рис. 7. Профилограмма (а) и общий вид (б) поверхности вольфрамового контактного покрытия, полученного осаждением из дугового разряда (современный способ)

Использование высокочувствительного метода исследования поверхности позволило получить не только структуру получаемого контактного покрытия, но и определить геометрические размеры (радиус и высоту) микровыступов, а также оценить коэффициент усиления электрического поля и влияние технологического режима нанесения покрытия на его параметры. Знание коэффициента усиления поля позволяет смоделировать процесс развития электрического пробоя и теоретически оценивать электрическую прочность вакуумных МК.

Для покрытия, полученного плазменным напылением без «приштамповки», высота микровыступов составила 6–7 мкм при радиусе 2–4 мкм, а для покрытия, нанесенного из

газовой фазы и из дугового разряда, значения высоты лежат в диапазоне 0,1 – 0,3 мкм при радиусе  $\approx 0,5$  мкм.

К сожалению, однозначной количественной зависимости электрической прочности от параметров покрытия получить не удалось из-за совокупного влияния очень многих факторов, но качественно с большой достоверностью можно говорить об увеличении электрической прочности при использовании покрытий из дугового разряда и осаждения из газовой фазы.

#### **Литература:**

1. Иваников А.С., Орешкин В.В., Скородумов В.Ф. Электрическая прочность вакуумных высоковольтных МК. Электронная техника, серия 4, вып. 4, 1992. – С. 9-10.
2. Молчанова Л.Г. и др. Обнаружение течей в отпаянных ЭВП. Электронная техника, серия 1, вып. 7, 1971. – С. 63-67.