

НОВЫЙ МЕТОД МОДИФИКАЦИИ МАГНИТОУПРАВЛЯЕМЫХ КОНТАКТОВ

*К.А. Арушанов**, *И.А. Зельцер***, *С.М. Карabanов, д.т.н. **,
*Майзельс Р.М., доктор электротехники***, *Моос Е.Н., д.т.н.****

** 390005, Россия, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1*

ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет»

*** 390027, Россия, г. Рязань, ул. Новая, 51В, ОАО «РЗМКП»*

**** 390000, Россия, г. Рязань, ул. Свободы, 46*

Рязанский государственный университет им. С.А. Есенина

Методами электронной оже-спектроскопии, атомно-силовой и оптической микроскопии изучены железоникелевые контактные поверхности герконов после ионно-индуцированной модификации. Показано, что коррозионная и эрозионная устойчивость модифицированных контактов связана с особенностями топографии поверхности и образованием нитридных слоев. Дано экспериментальное обоснование возможности создания герконов с модифицированной контактной поверхностью вместо гальванопокрытия из драгоценных металлов.

Iron-nickel contact surfaces after ion-induced modification were studied by Auger spectroscopy and atomic-force microscopy methods. It was shown that corrosion and erosion resistance of the modified contacts is associated with the special features of the surface topography and with the formation of nitride layers of iron and nickel. Experimental justification of an opportunity to create reed switches with the modified contact surface instead of precious-metal-based electroplating was formed.

1. Введение

Одной из основных технологических проблем производства герконов является нанесение специальных (коррозионно- и эрозионностойких) покрытий на контактные поверхности пермаллоевых пружин. При этом для нанесения покрытий в основном используется гальванотехнология, а в качестве материалов – благородные и драгоценные металлы (золото, палладий, родий, рутений и т.п.) [1].

Однако этот технологический подход характеризуется большой электро- и материалоемкостью, дороговизной оборудования, низким экологическим уровнем, трудностью осаждения сплава требуемого химического, фазового состава и структуры при получении тонких беспористых или толстых пленок с низкими внутренними напряжениями и с высокой адгезией к материалу контакт-детали.

Известно, что одним из наиболее перспективных способов повышения коррозионной и эрозионной устойчивости поверхности металлов является ионное азотирование в пульсирующей плазме тлеющего разряда [2, 3].

Идея применения этого метода для создания контактных поверхностей, альтернативных гальванопокрытиям из драгоценных металлов, впервые нашла свое экспериментальное подтверждение в работе [4]. Дальнейшее развитие она получила в цикле работ [5-25]. Данная работа является логическим продолжением этих работ. Целью ее является изучение влияния параметров ионно-плазменной обработки, режимов коммутации на свойства железоникелевых контактных поверхностей и создание на этой основе новой технологии модифицирования герконов с применением азотирования и реактивного катодного распыления в пульсирующем разряде.

2. Материалы и методы

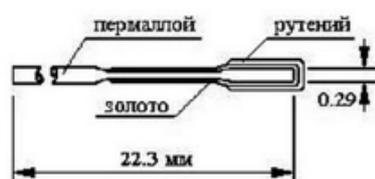
2.1. Образцы

Опытными образцами являлись герконы МКА-14108, конструктивно выполненные на базе серийных приборов МКА-14103 [1] (рис. 1). Особенность конструкции этих герконов по сравнению с серийными приборами заключается в отсутствии каких-либо специальных покрытий на пермалловых контактах.



Геркон МКА-14108

с наноструктурированными контактными поверхностями деталей



Контакт-деталь геркона МКА-14103
с гальванопокрытием



Контакт-деталь геркона МКА-14108
после ионно-плазменной обработки

Рис. 1. Конструкция геркона МКА-14108

2.2. Технология

Схема технологического маршрута изготовления герконов МКА-14108 представлена на рис. 2, а основные технологические процессы – на рис. 3. Особенность технологии изготовления герконов МКА-14108 по сравнению с типовой схемой техпроцесса [1] состоит в замене операции «Нанесение гальванопокрытия» на операцию «Ионно-плазменная обработка».

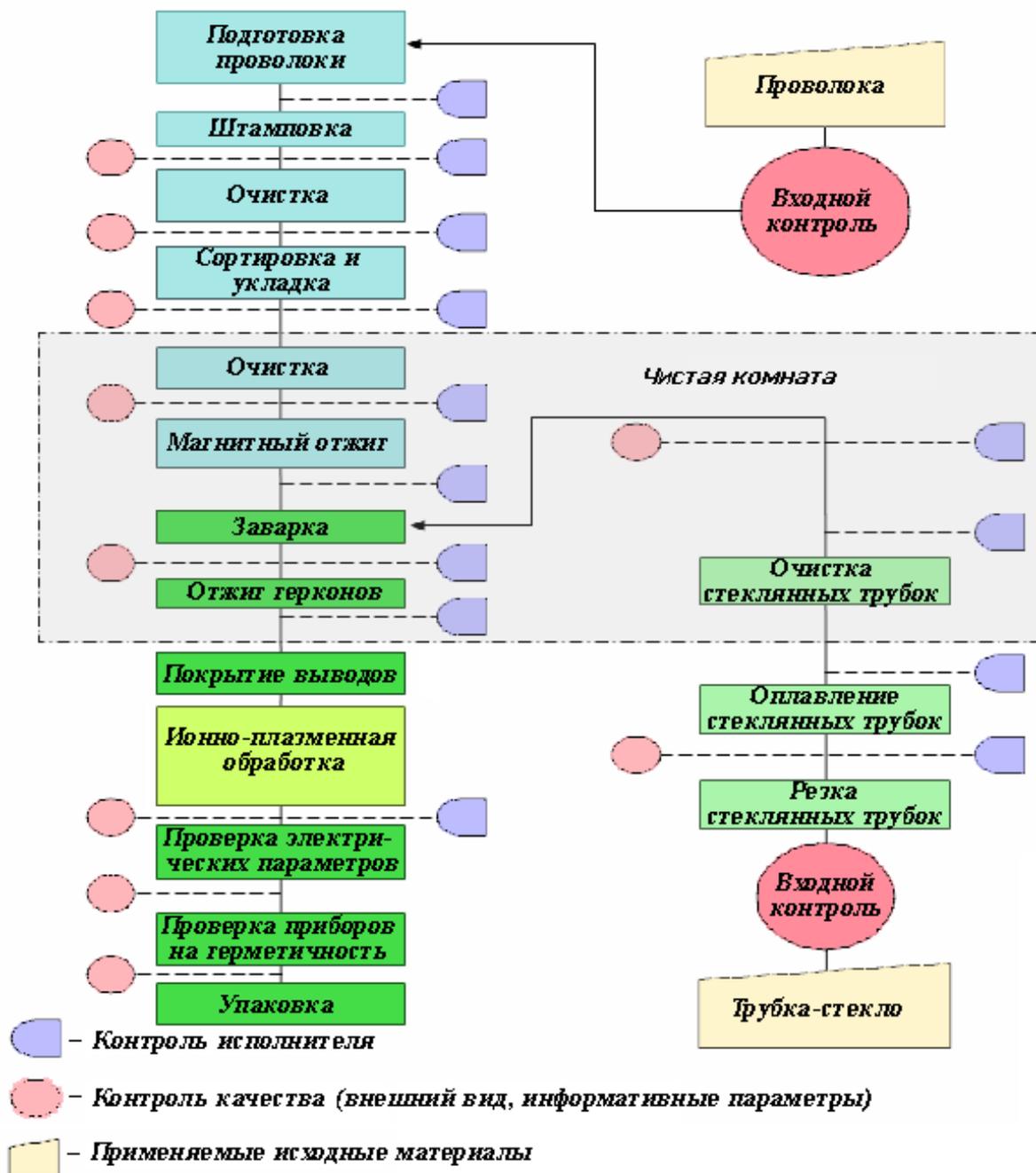


Рис. 2. Схема технологического маршрута герконов МКА-14108 с модифицированной контактной поверхностью (вместо гальванопокрытия)

Контактные пружины штамповались из пермаллоевой проволоки марки «Dilaton», обезжиривались и отжигались в атмосфере водорода. Проволока вытягивалась из катанки пермаллоя (Ni 52 %, Fe 48 %) вакуумной плавки. В качестве газового наполнения при герметизации использовался спектрально чистый (99,999 %) азот с давлением в оболочке геркона $p = 33 \cdot 10^3 - 40 \cdot 10^3$ Па.

Основные технологические процессы



Ключевая технология: модификация



Рис. 3. Технология модификации

2.3. Ионно-плазменная обработка

Ионно-плазменная обработка (ИПО) контактных поверхностей проводилась высоковольтными импульсными разрядами при разомкнутых контактах (зазор $d = 27 - 30$ мкм) на специальной установке [5, 7] (рис. 3). Использовались два режима ИПО, отличающиеся электрофизическими условиями разряда, и, как следствие, степенью нагрева подложки. Первый режим ИПО – режим ионного азотирования – обеспечивает диффузионное насыщение приповерхностных слоев контактов в области перекрытия атомами азота, формирование на обрабатываемых деталях азотированного слоя с заданными контактными свойствами. Оптимизация свойств упрочняемой поверхности, ее коррозионная и эрозионная стойкость, электропроводность обеспечивается за счет необходимого сочетания нитридного и диффузионного слоев, которые вырастают в основной материал. В зависимости от химического состава нитридный слой является либо γ' -фазой (Fe_4N), либо ϵ -фазой ($Fe_{2,3}N$) [4-6]. Второй режим – режим реактивного катодного распыления. В процессе его на поверхность контактов напыляется пленка, состоящая из нитридов железа и никеля. Это покрытие так же, как и ионно-азотированные слои, удовлетворяет современным требованиям к контактным поверхностям герконов. Длительность однократной ИПО в обоих режимах составляла 30 с.

Отличительная особенность ионного азотирования и реактивного катодного напыления герконов состоит в том, что в отличие от традиционных технологий [2, 3, 26], насыщение приповерхностных слоев контакт-деталей азотом и напыление контактных покрытий производится не в азотосодержащем вакууме ($p = 150-1000$ Па), а при относительно высоком давлении ($p = 33 \cdot 10^3 - 40 \cdot 10^3$ Па) азота. При этом для ионного азотирования приповерхностных слоев и формирования покрытий методом реактивного катодного распыления не требуется применения специального вакуумного оборудования [2, 26]. Процессы азотирования и напыления происходят непосредственно в самом герконе.

Стеклобаллон выполняет функцию рабочей камеры, а контакт-детали попеременно служат анодом и катодом.

2.4. Методика исследований

Образцы после обработок высоковольтными разрядами и без таковых подвергались коммутационным испытаниям. Измерения сопротивления, напряжения пробоя герконов и коммутационные испытания на безотказность проводились с помощью специализированного оборудования [1] по методикам, представленным в [1].

О состоянии модифицированной поверхности судили по результатам электронной оже-спектроскопии (ЭОС), атомно-силовой (АСМ) и оптической микроскопии (ОМ). Полученные при этом данные сопоставлялись с результатами измерения ряда характеристик, в частности, напряжения пробоя и переходного контактного сопротивления.

3. Результаты и их обсуждение

Анализ топографии поверхности контактов (до и после их обработки) осуществлялся на воздухе с помощью атомно-силового микроскопа (зондовой нанолaborатории (ЗНЛ) NTEGRA производства компании NT-MDT, Зеленоград, Москва, Россия). Для оптических исследований рабочих поверхностей контакт-деталей герконов использовался металлографический микроскоп ММР-4 с компьютерной системой визуализации изображений. Использовались Si-кантилеверы марки NSG10/W₂C, с твердым токопроводящим покрытием W₂C толщиной 30 нм, с работой выхода $e\phi_p = 4,902$ эВ.

Исследование элементного и химического состава поверхности контактов осуществлялось на электронном оже-спектрометре [27]. Прибор оснащен анализатором энергий электронов типа цилиндрического зеркала (с разрешением 0,25 %) со встроенной электронной пушкой, имеющей ток пучка до 1 мкА при диаметре пучка 100 мкм. Для очистки поверхности контакт-деталей герконов и их послойного оже-анализа применялась ионная пушка с дифференциальной откачкой рабочего газа (Ar) и плотностью ионного тока до 3,5 мА/см². Все измерения проводились в вакууме 2×10^{-7} Па для устранения эффектов электронно-стимулированной адсорбции молекул остаточных газов на исследуемых поверхностях.

3.1. Ионно-азотированные слои

Поверхность контакт-детали геркона после проведения ИПО по первому режиму (ионного азотирования) можно условно разделить на три, характерные по топографии поверхности, области, которые, собственно, и обнаруживаются на изображениях контакт-деталей, полученных в оптическом (рис. 4) и атомно-силовом (рис. 5) микроскопах.

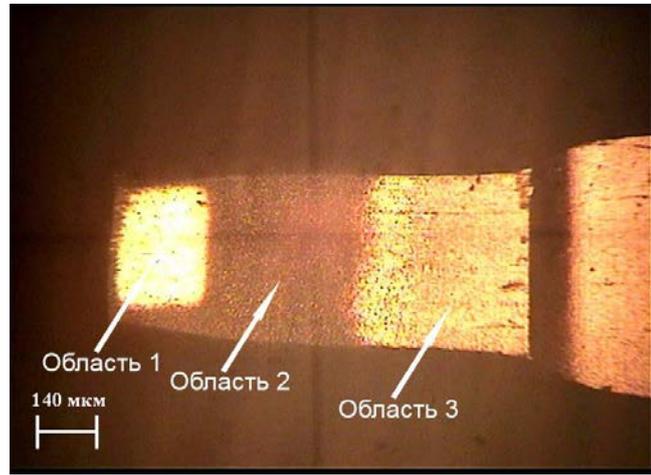


Рис. 4. Контакт-деталь геркона после 100-кратной ионно-плазменной обработки

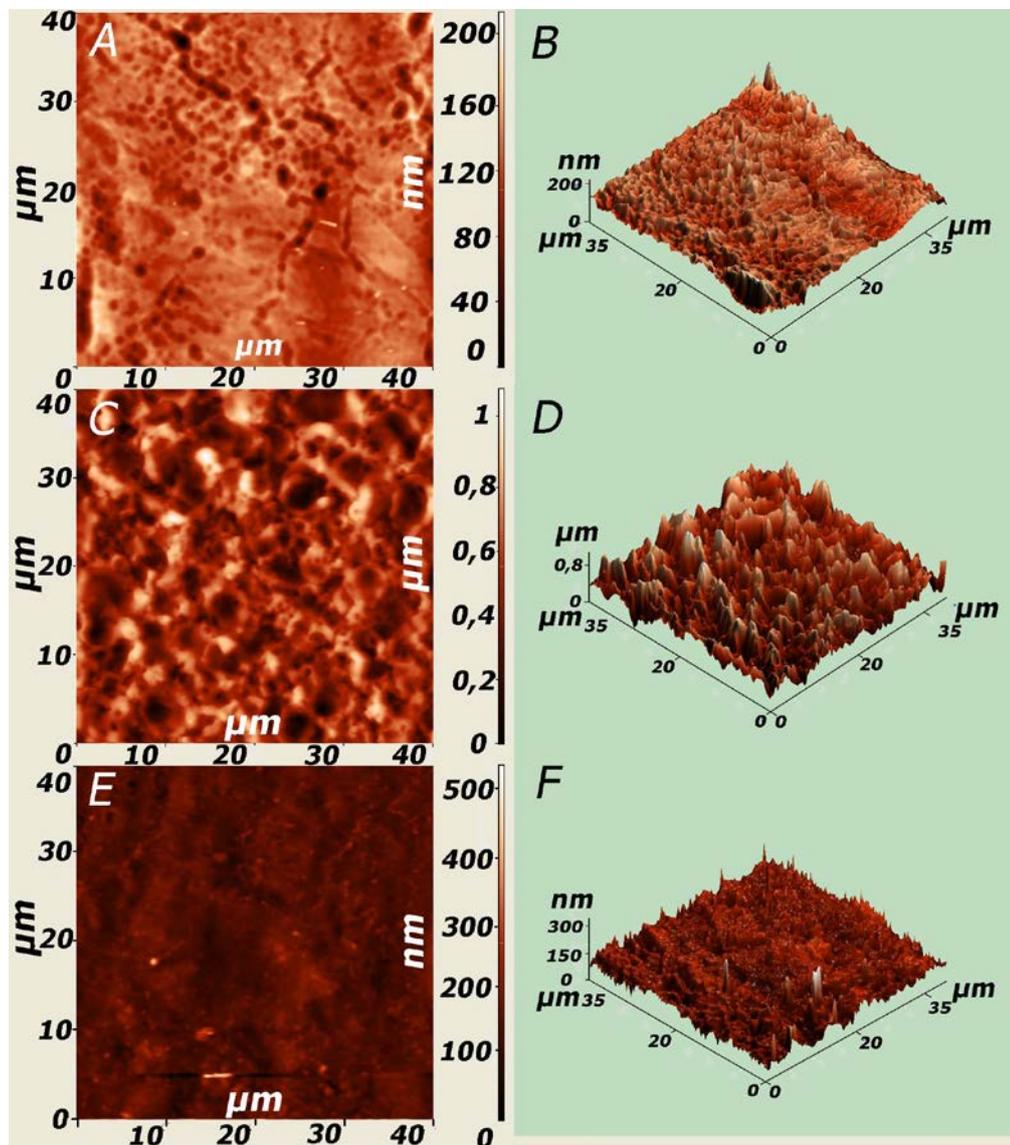


Рис. 5. АСМ-изображение контактной поверхности геркона после 100-кратной ИПО: (А) и (В) 2D- и 3D-изображение области 1; (С) и (D) 2D- и 3D-изображение области 2; е, f – 2D- и 3D-изображение области 3

Область 1 (рис. 4, 5 *a,b*) – это рабочая область (область перекрытия контакт-деталей), где, собственно, и зажигается газовый разряд при подаче напряжения на разомкнутые контакты геркона. В результате реактивного катодного распыления в газовой фазе области перекрытия образуются нитриды (FeN и NiN), часть которых осаждается на поверхность контактов в области 1, где под действием ионной бомбардировки и происходит азотирование поверхности по механизму Кельбеля [26].

На рис. 6 представлены реакции, определяющие процесс ионного азотирования (первый режим ИПО) при тлеющем разряде по Кельбелю, а на рис. 6, *b* – реакции, определяющие процесс напыления контактных покрытий методом катодного распыления.

Ионы азота, ускоряясь в области катодного падения потенциала, бомбардируют мишень – катод. При этом большая часть энергии ионов (около 90 %) расходуется на нагрев мишени, а оставшая часть – на эмиссию электронов, ионную имплантацию и распыление атомов (Fe , Ni , C , O), расположенных на поверхности мишени. В результате реактивного катодного распыления в газовой фазе образуются нитриды железа и никеля, которые осаждаются на контакт-детали и стеклобаллон геркона. При попадании на поверхность металла с температурой около $400\text{--}500\text{ }^\circ\text{C}$ молекулы нитридов металлов MeN (Fe , Ni) пермаллоя диссоциируют и образуют нитриды низшего порядка Me_2N , Me_3N , Me_4N . Выделяющийся при этом азот частично диффундирует в мишень и испаряется в плазму.

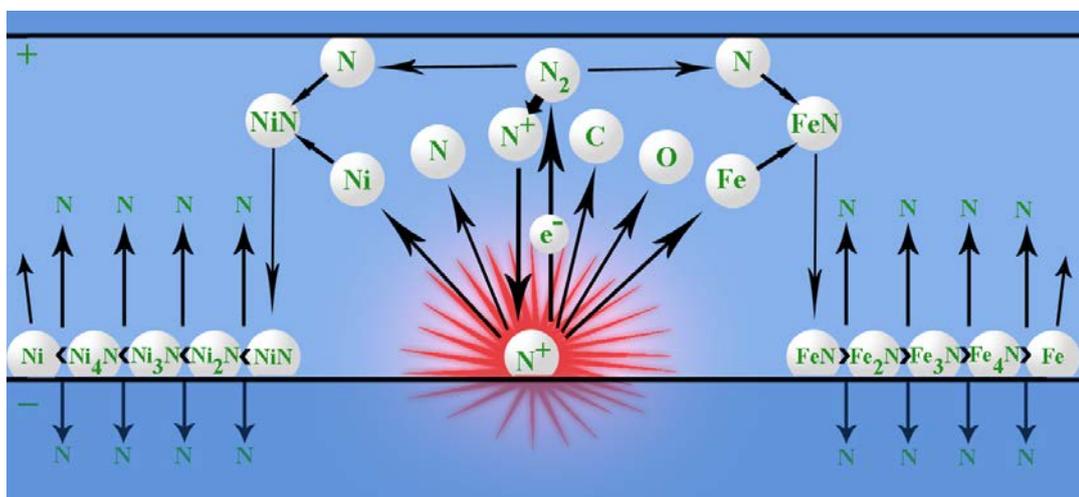


Рис. 6. Ионное азотирование

Часть молекул FeN и NiN в результате диффузии будет осаждаться на поверхности контактов, в соседней с областью 1 области 2 (рис. 4, 5 *c,d*). Область 3, если судить по оптическому (рис. 4) и атомно-силовому (рис. 5 *e,f*) изображениям, не должна содержать нитриды или содержит их в незначительном количестве. Нагрев поверхности области 1 происходит в результате ионной бомбардировки, а областей 2 и 3 – в результате теплообмена с областями 1 и 2, соответственно. Поэтому, из-за слабого нагрева, диссоциация молекул FeN и NiN , а, следовательно, и ионное азотирование поверхностей областей 2 и 3 маловероятно. На поверхности контакт-деталей в области 2 (рис. 4) и на внутренней поверхности стеклобаллона, расположенной вблизи области перекрытия, продукты реактивного катодного распыления образуют покрытие черного цвета (рис. 7). В том случае, когда энергии ионов (или плотности тока) недостаточно для преодоления температурного порога диссоциации молекул FeN и NiN , такое же покрытие может быть образовано и в области 1. В результате диффузии незначительное количество продуктов катодного распыления попадает также на обратные стороны контакт-деталей геркона.



Рис. 7. Геркон после 100-кратной ионно-плазменной обработки

Проводящие нановыступы. Полученные с помощью атомно-силового микроскопа и электронного оже-спектрометра профиль распределения концентраций элементов в приповерхностной области (рис. 8) и изображения наноструктурных контактных 50 нм выступов (рис. 9) на новой гетерогенной Fe_3N (30 нм) и Fe_4N (40 нм) основе свидетельствуют о формировании наноструктурного поверхностного контактного слоя.

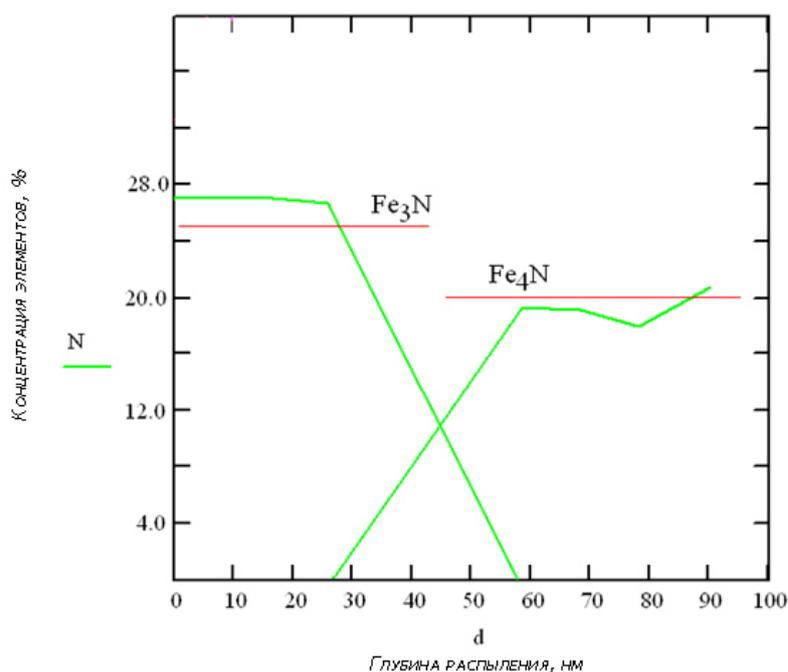


Рис. 8. Восстановленный профиль распределения фаз по глубине с указанием концентрации азота в стехиометрических соединениях Fe_3N и Fe_4N . 1-кратная обработка

Поверхностная наноструктура (нанорельеф с проводящими нановыступами) обеспечивает реализацию принципа повышенной надежности – многоуровневой эшелонированной защиты контактов от эрозионных, коррозионных и механических разрушений, повышает помехозащищенность от посторонних частиц, и в конечном итоге кардинально решает проблему качества герконов, существенно уменьшая количество отказов (ppm) в процессе эксплуатации.

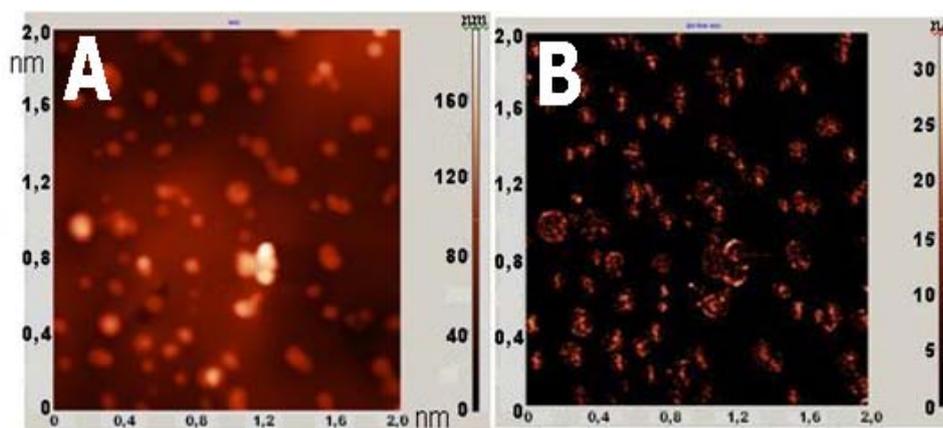


Рис. 9. АСМ-изображение участка азотированной поверхности контактной пружины геркона: а) метод постоянной действующей силы; б) метод отображения сопротивления растекания. 1-кратная обработка

Поверхностные поры и конусы. Воздействие на поверхность ионно-плазменных потоков изменяет энергетическое ее состояние, что проявляется в эволюции рельефа, например, неоднородного травления, и в выявлении поликристаллической структуры твердого тела. Кроме того, изменения рельефа выявляют ионно-индуцированные напряжения, процессы рекристаллизации, изменения состава приповерхностных слоев и изменение дислокационной подвижности.

Ионно-плазменные потоки инициируют формирование поверхностных напряжений, активацию диффузии, изменение дислокационной структуры, фазового состояния. Развитие этих процессов само по себе приводит, как правило, к модификациям рельефа. Необходимо принять также в расчет результат взаимодействия всех указанных выше процессов формирующегося рельефа с процессами распыления, ионно-стимулированной сегрегации, десорбции и т.п.

В результате ионной бомбардировки в области 1 на поверхности контакт-деталей образуются поверхностные поры (Рис. 5, а, 5, б, 10, 11). Концентрация их, как видно из рис. 5 а, 5 б, 10, возрастает с увеличением длительности ИПО.

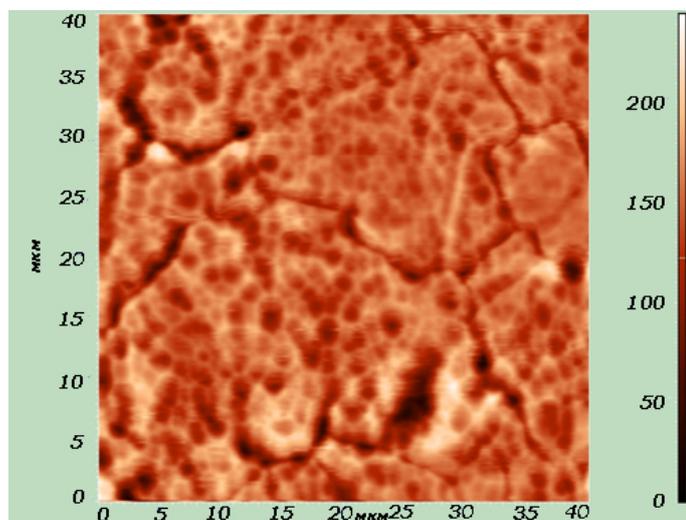
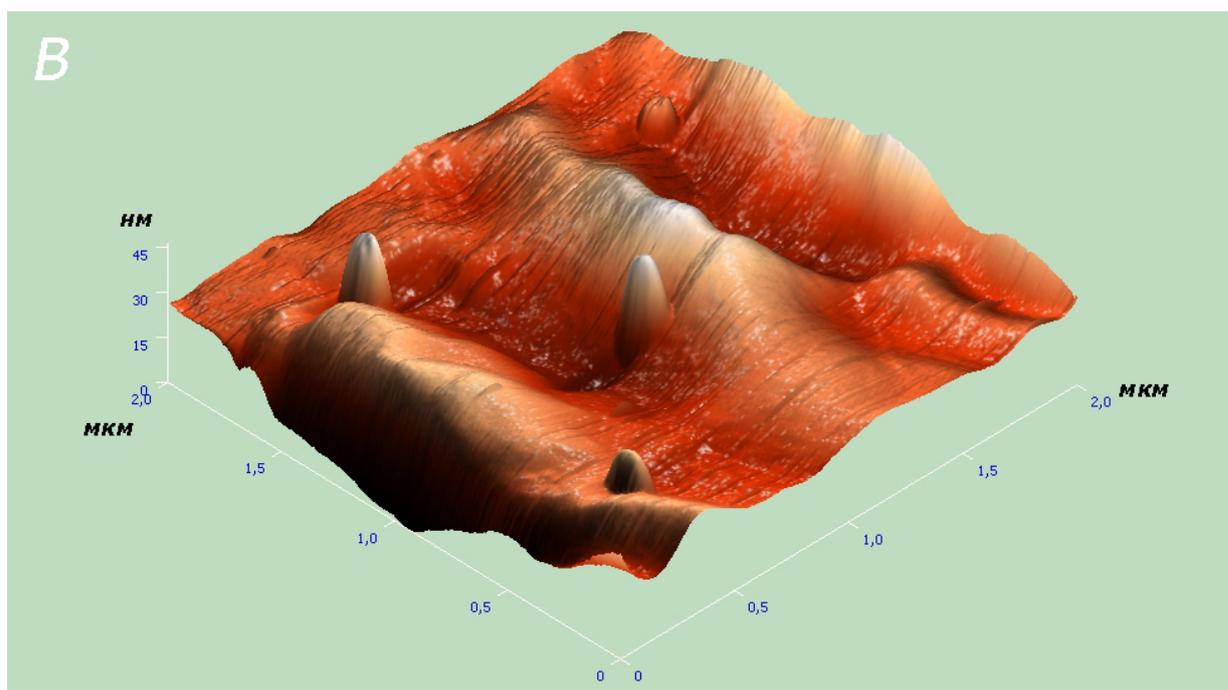
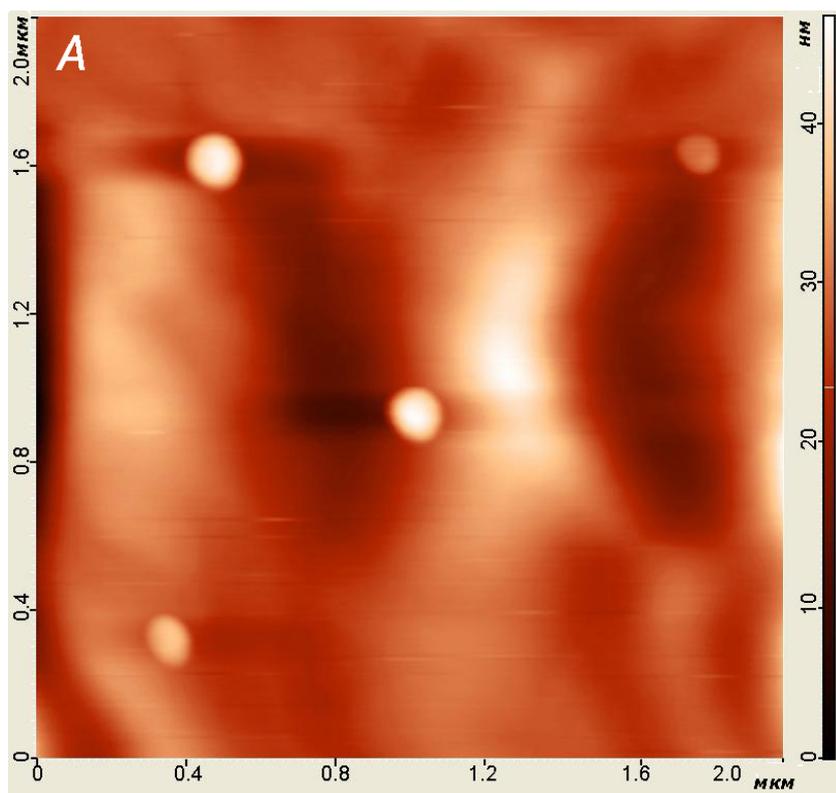


Рис. 10. 2D- АСМ-изображение области 1 контактной поверхности геркона после 200-кратной ИПО

На определенном этапе развития, на дне пор начинают расти конические выступы (рис. 11, а, б).



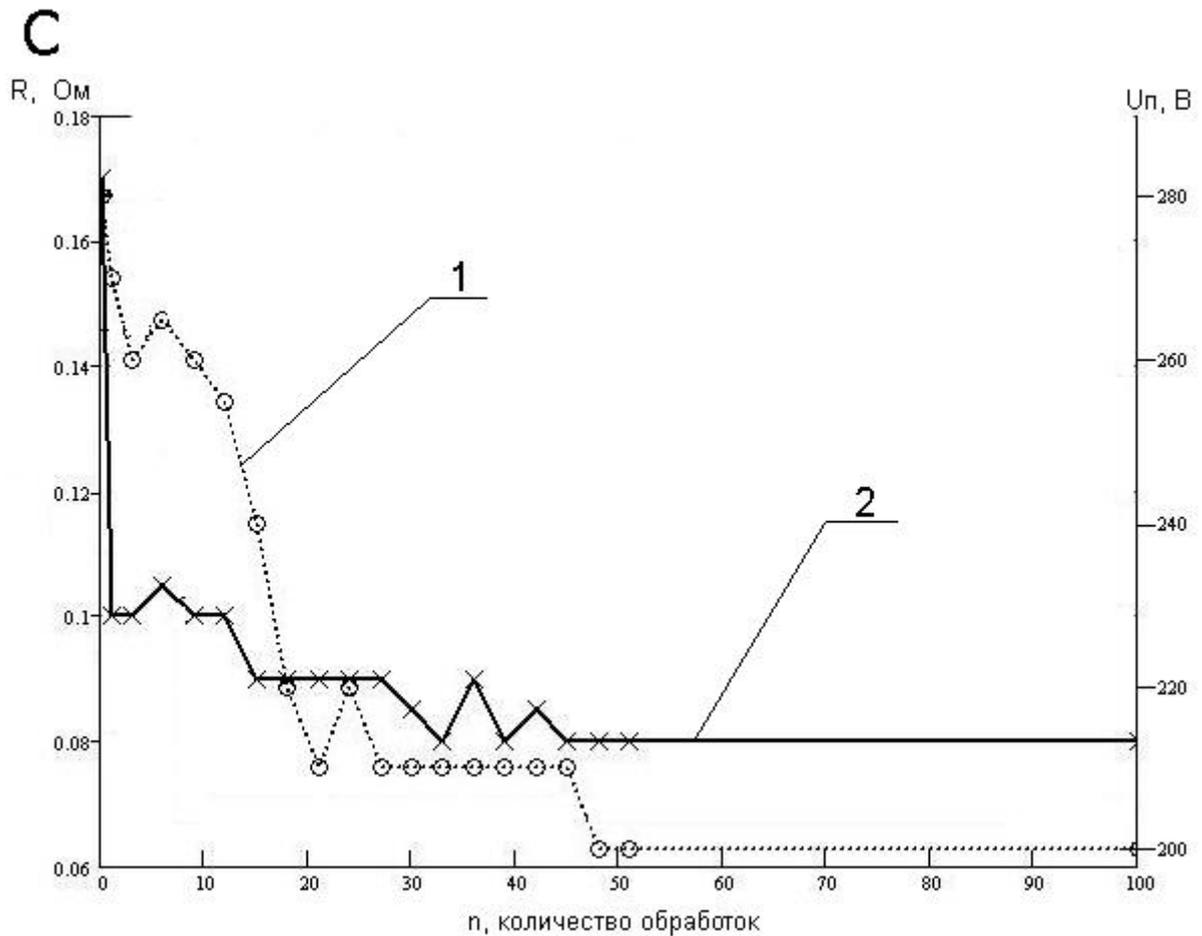


Рис. 11. 2D- (А) и 3D- (В) АСМ-изображение области 1 контактной поверхности геркона после 100-кратной ИПО; (С) зависимости сопротивления R (кривая 2), напряжения пробоя U_p (кривая 1) геркона МКА-14108 по медиане от количества обработок n . Количество герконов в партии 100 шт.

Условия появления и закономерности развития поверхностных пор и конусов на облучаемой ионами поверхности твердого тела рассмотрены в работе [28]. По мнению ее автора, основной причиной их образования являются процессы, порожденные ионно-индуцированными напряжениями и связанные с перемещением атомов в поверхностном слое. Это обусловлено ионно-ускоренной диффузией, перемещением дислокаций и рекристаллизацией. Формирование пор, вероятно, происходит за счет пересыщения поверхности внедренными атомами и заполнения ими микроскопических полостей в кристаллической решетке в результате ионно-стимулированных диффузионных и рекомбинационных процессов в приповерхностных слоях. Выход этих образований на поверхность в поле ионно-индуцированных напряжений приводит к появлению открытых пор, которые вначале имеют кольцевую форму, с постепенным увеличением наклона боковых стенок. Развитие пор завершается ростом на их дне конических выступов.

При ионной бомбардировке перенасыщение атомов со склонов поры на ее дно ведет к появлению участков с пониженным уровнем напряжений, и, следовательно, к формированию на дне пор конусов за счет локальных диффузионных стоков. При этом конусные образования понижают уровень напряжений на дне, поток материала из поры на поверхность замедляется, пора в результате уменьшается и затем расплывается [28].

Поверхности с таким рельефом (рис. 11) могут обладать пониженным коэффициентом распыления и вторичной электронной эмиссии. Они в меньшей степени отражают ионные потоки, характеризуются селективностью оптических свойств, высокими автоэмиссионными параметрами. Структура конусов может изменить каталитические, коррозионные и

эмиссионные свойства контактной поверхности герконов. Как видно из экспериментально полученной зависимости напряжения пробоя от количества обработок (рис. 11, с), стабилизация конусной поверхностной структуры наступает уже после проведения 30-50 обработок.

3.2. Покрyтия, полученные методом реактивного катодного распыления

Поверхность контакт-детали геркона после проведения ИПО по второму режиму (реактивного катодного распыления) можно условно разделить по изображениям поверхности контакт-деталей, полученным с помощью оптического (рис. 12) и атомно-силового (рис. 13) микроскопов, на две характерные по топографии области.

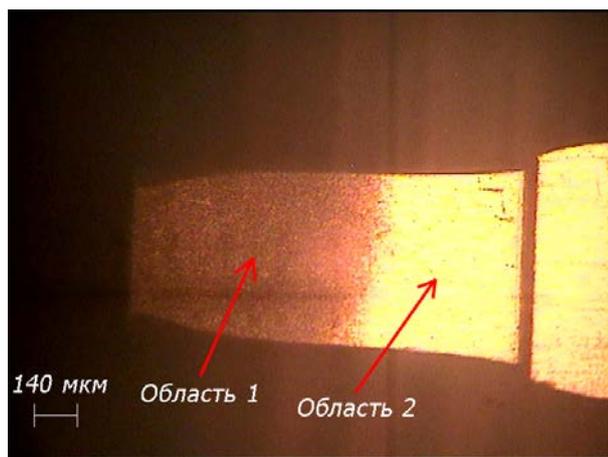


Рис. 12. Контакт-деталь геркона после 30-кратной ионно-плазменной обработки (режим реактивного катодного распыления)

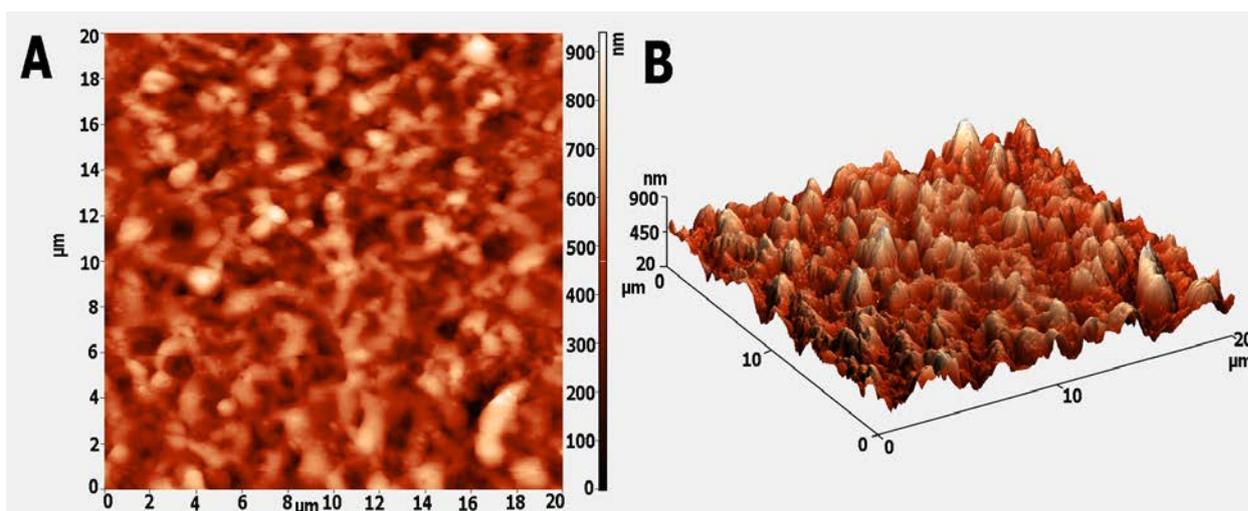


Рис. 13. АСМ-изображение контактной поверхности геркона после 30-кратной ИПО (режим реактивного катодного распыления): (А) и (В) 2D- и 3D-изображение области 1

Область 1 (рис. 12, 13 *a,b*) – это рабочая область (область перекрытия контакт-деталей), где, собственно, и зажигается газовый разряд при подаче напряжения на разомкнутые контакты геркона. В результате реактивного катодного распыления в газовой фазе области

перекрытия образуются нитриды (FeN и NiN), большая часть которых осаждается на поверхность контактов в области 1.

На рис. 14 представлены реакции, определяющие процесс осаждения контактного покрытия методом реактивного катодного распыления. Ионы азота, ускоряясь в области катодного падения потенциала, бомбардируют мишень – катод. При этом большая часть энергии ионов (около 90 %) расходуется на нагрев мишени, а оставшаяся часть – на эмиссию электронов, ионную имплантацию и распыление атомов (Fe, Ni, C, O), расположенных на поверхности мишени. В результате реактивного катодного распыления в газовой фазе образуются нитриды железа и никеля, которые затем осаждаются на контакт-детали и стеклобаллон геркона. При осаждении на контактную поверхность в области 1 (с температурой ниже 400-500 °С) молекулы нитридов металлов MeN (Fe, Ni) пермаллоя не диссоциируют, как в случае ионного азотирования, а образуют пленку черного цвета (рис. 12). Толщина покрытия, по данным металлографических исследований, составила (после 30-кратной ИПО) около 400 нм.

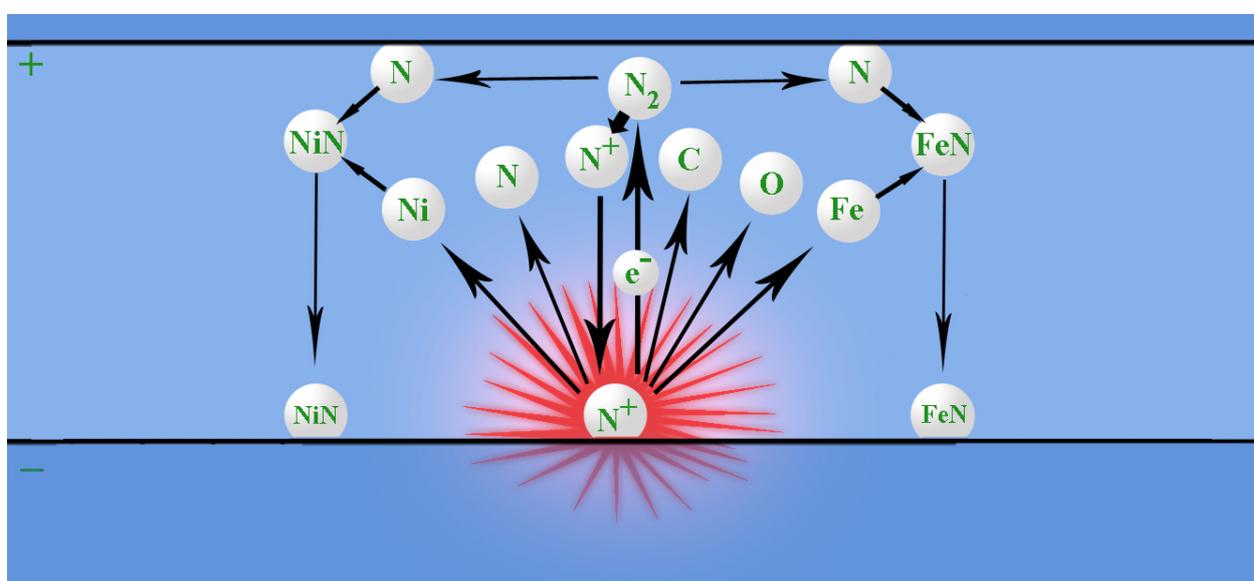


Рис. 14. Осаждение покрытия методом реактивного катодного распыления

Часть молекул FeN и NiN в результате диффузии будет осаждаться на поверхности контактов, в соседней с областью 1 области 2 (рис. 12) и на внутренней поверхности стеклобаллона, расположенной вблизи области перекрытия (рис. 7). Незначительное количество продуктов катодного распыления попадает также на обратные стороны контакт-деталей геркона.

Коммутационные испытания. Известно [1], что главный эффект действия коррозии, эрозии и загрязнений на электрические контакты заключается в нарушении проводимости, поэтому сопротивление контактов этим процессам может характеризоваться числом замыканий, при котором катастрофически изменяется проводимость. Устойчивость контактов к эрозии может характеризоваться числом замыканий, при котором наступает нарушение проводимости или неразмыкание контактов.

Экспериментальные образцы герконов после обработок высоковольтными разрядами в режиме реактивного катодного распыления (второй режим ИПО) и без таковых подвергались сравнительным коммутационным испытаниям по методике, разработанной ранее в работе [25] для герконов МКА-14108 с ионно-азотированными контактными поверхностями. Испытания проводились на активную нагрузку и в режиме холостого хода (без нагрузки). Это позволило оптимизировать режимы модификации поверхности контактных пружин и

изучить физические процессы, происходящие на всех этапах обработки и эксплуатации герконов.

Сравнительные коммутационные испытания опытных герконов МКА-14108 и серийных приборов МКА-14103 показали, что наработка опытных герконов МКА-14108, предварительно обработанных высоковольтными импульсными разрядами в режиме реактивного катодного распыления, удовлетворяет требованиям, предъявляемым к долговечности серийных приборов МКА-14103 (табл. 1).

Таблица 1

Результаты сравнительных коммутационных испытаний

Режим коммутационных испытаний	Тип герконов	Без сбоев, %	Rmax до испытаний, Ом	Rmax после испытаний, Ом
50 мВ - 5 мкА, 100 Гц, 10 ⁶ срабатываний	МКА-14103	100	0,1	0,1
	МКА-14108, без обработки	21	0,25	10
	МКА14108, с обработкой	100	0,08	0,09
5 В - 10 мА, 100 Гц, 10 ⁶ срабатываний	МКА-14103	100	0,17	0,11
	МКА14108, без обработки	27	0,35	22,7
	МКА14108, с обработкой	100	0,07	0,08
20 В - 0,5 А, 50 Гц, 5·10 ⁶ срабатываний	МКА-14103	38	0,16	40
	МКА14108, без обработки	47	0,31	0,11
	МКА14108, с обработкой	100	0,09	0,10
24 В - 400 мА, 50 Гц, 5·10 ⁵ срабатываний	МКА-14103	100	0,13	0,5
	МКА14108, без обработки	100	0,29	0,11
	МКА14108, с обработкой	100	0,07	0,01
36 В - 15 мА, 50 Гц, 5·10 ⁶ срабатываний	МКА-14103	25	0,2	8,7
	МКА14108, без обработки	53	0,49	0,34
	МКА14108, с обработкой	100	0,07	0,09
50 В - 50 мА, 50 Гц, 5·10 ⁵ срабатываний	МКА-14103	100	0,14	0,22
	МКА14108, без обработки	100	0,38	0,25
	МКА14108, с обработкой	100	0,07	0,08
100 В - 100 мА, 50 Гц, 5·10 ⁵ срабатываний	МКА-14103	2	0,17	0,19
	МКА14108, без обработки	100	0,27	0,23
	МКА14108, с обработкой	100	0,08	0,09

Для определения и оптимизации режима обработки были проведены испытания опытных образцов герконов МКА-14108 до и после обработки без нагрузки (на холостом ходу). Количество коммутаций изменялось поэтапно от 0 до 10⁷ соударений. На каждом этапе испытаний герконов измерялось R (рис. 15).

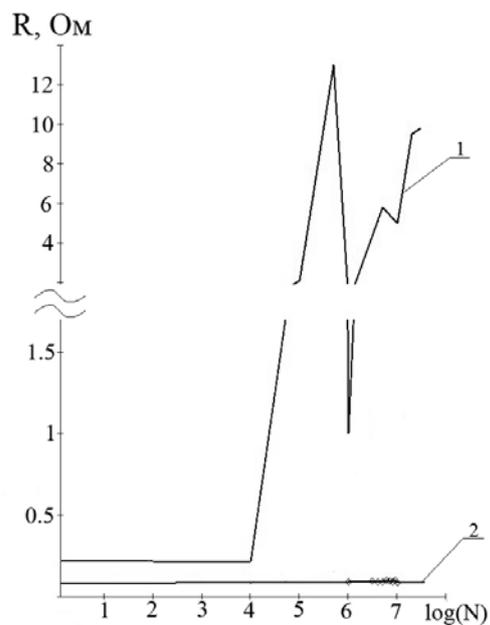


Рис. 15. Зависимость сопротивления R геркона МКА-14108 по медиане от количества срабатываний N в «сухой» цепи (1 – необработанные контакт-детали, 2 – контакт-детали после ИПО в режиме реактивного катодного распыления)

Изменения морфологии поверхности контактов в зависимости от количества коммутаций изучались в металлографическом и атомно-силовом микроскопах (рис. 16-19).

С увеличением количества срабатываний сопротивление герконов, предварительно обработанных высоковольтными импульсными разрядами, остается стабильным и не превышает 0,1 Ом (рис. 15, кривая 2). Сопротивления необработанных герконов, напротив, с увеличением количества срабатываний возрастают примерно в 100 раз и при $3 \cdot 10^7$ срабатываний достигает 8 Ом (рис. 15, кривая 1).

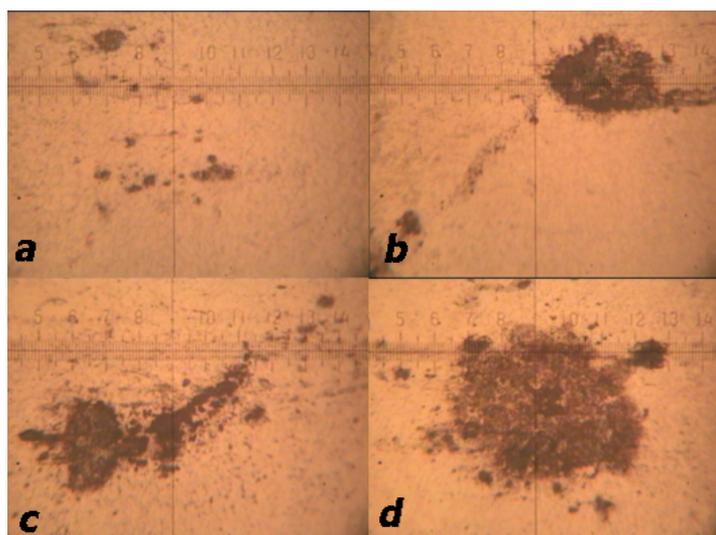


Рис. 16. Поверхности контактов герконов МКА-14108 после N срабатываний на холостом ходу, где N : (A) 10^4 ; (B) – 10^5 ; (C) 10^6 ; (D) 10^7 . Увеличение 300X

При количестве срабатываний 10^4 на поверхности контактов герконов без специальных покрытий, в области контактирования, появляются черно-коричневые пятна (рис. 16). Это

продукты термического разложения полимерных пленок, образующихся в процессе коммутаций из адсорбированных на поверхности контактов углерода, кислорода и водорода. С увеличением количества коммутаций до 10^5 размер и степень почернения этих пятен увеличиваются, и синхронно с этим процессом возрастает R. В диапазоне $10^5 - 10^6$ наблюдается разрушение полимерных пленок и снижение R. При дальнейшем наращивании числа коммутаций (вплоть до 10^7) вместо разрушенных соударениями пленок начинают появляться новые полимерные покрытия, что сопровождается увеличением R.

Из рассмотрения изображений контактных поверхностей, приведенных на рис. 17-19, видно, что рост сопротивления герконов с необработанными контакт-деталью происходит также из-за эрозии поверхности (на нее указывает стрелка на рисунках) вследствие уменьшения площади фактического контакта.

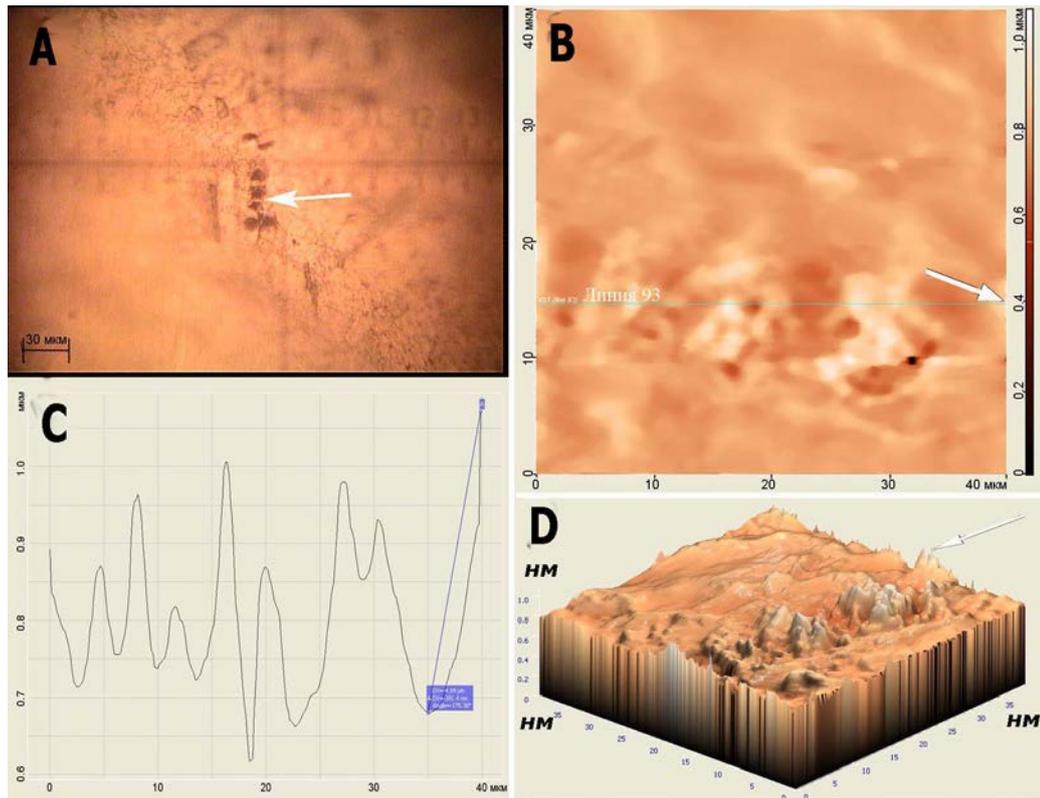


Рис. 17. Поверхность необработанной контакт-детали геркона МКА-14108 после $5 \cdot 10^5$ срабатываний в «сухой» цепи: (А) ОМ-изображение, увеличение 300X; (В) 2D АСМ-изображение, (С) профилограмма поверхности вдоль линии 93, (D) 3D АСМ-изображение

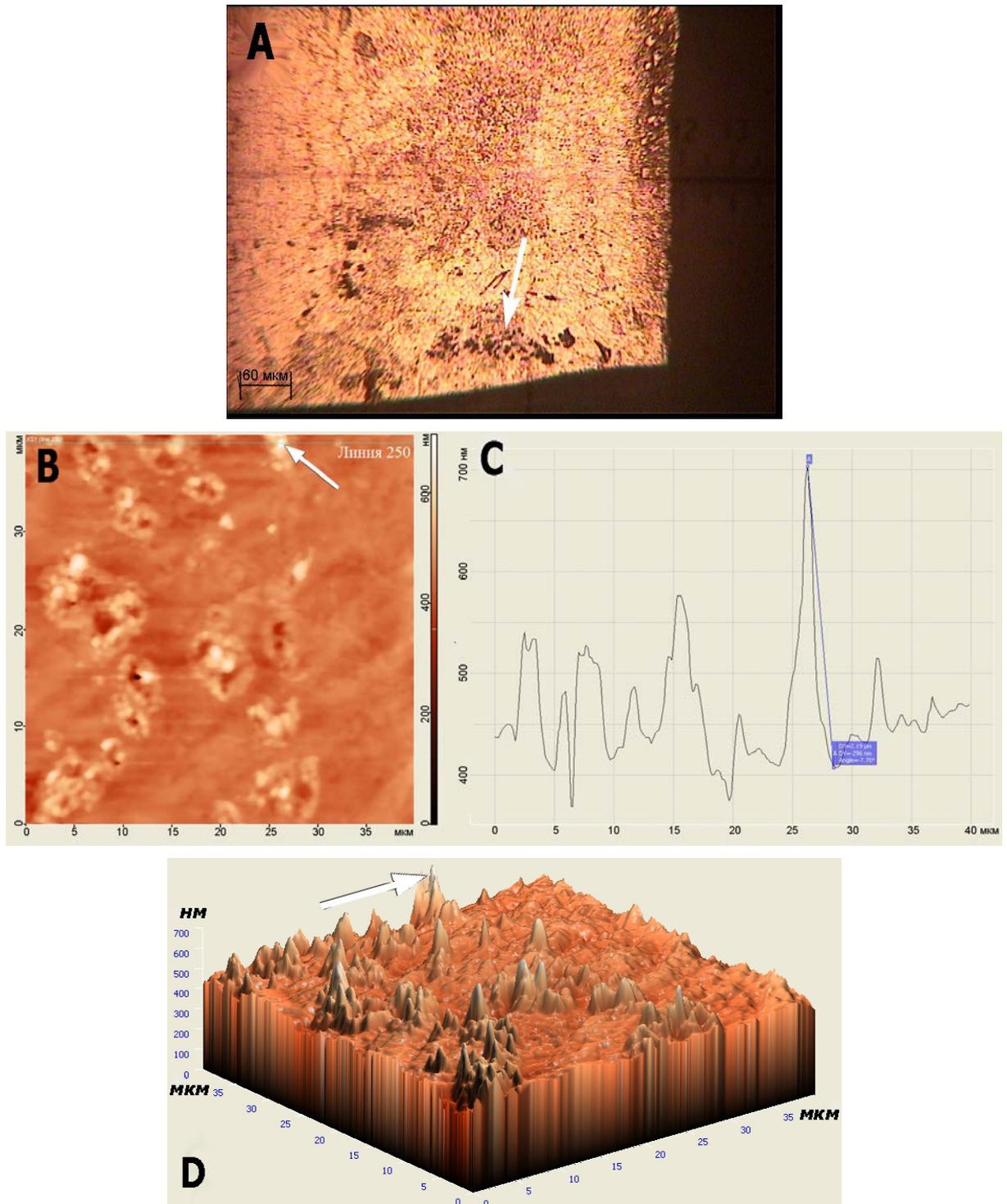


Рис. 18. Поверхность необработанной контакт-детали геркона МКА-14108 после 10^6 срабатываний в «сухой» цепи: (А) ОМ-изображение, увеличение 300X; (В) 2D АСМ-изображение, (С) профилограмма поверхности вдоль линии 250, (D) 3D АСМ-изображение

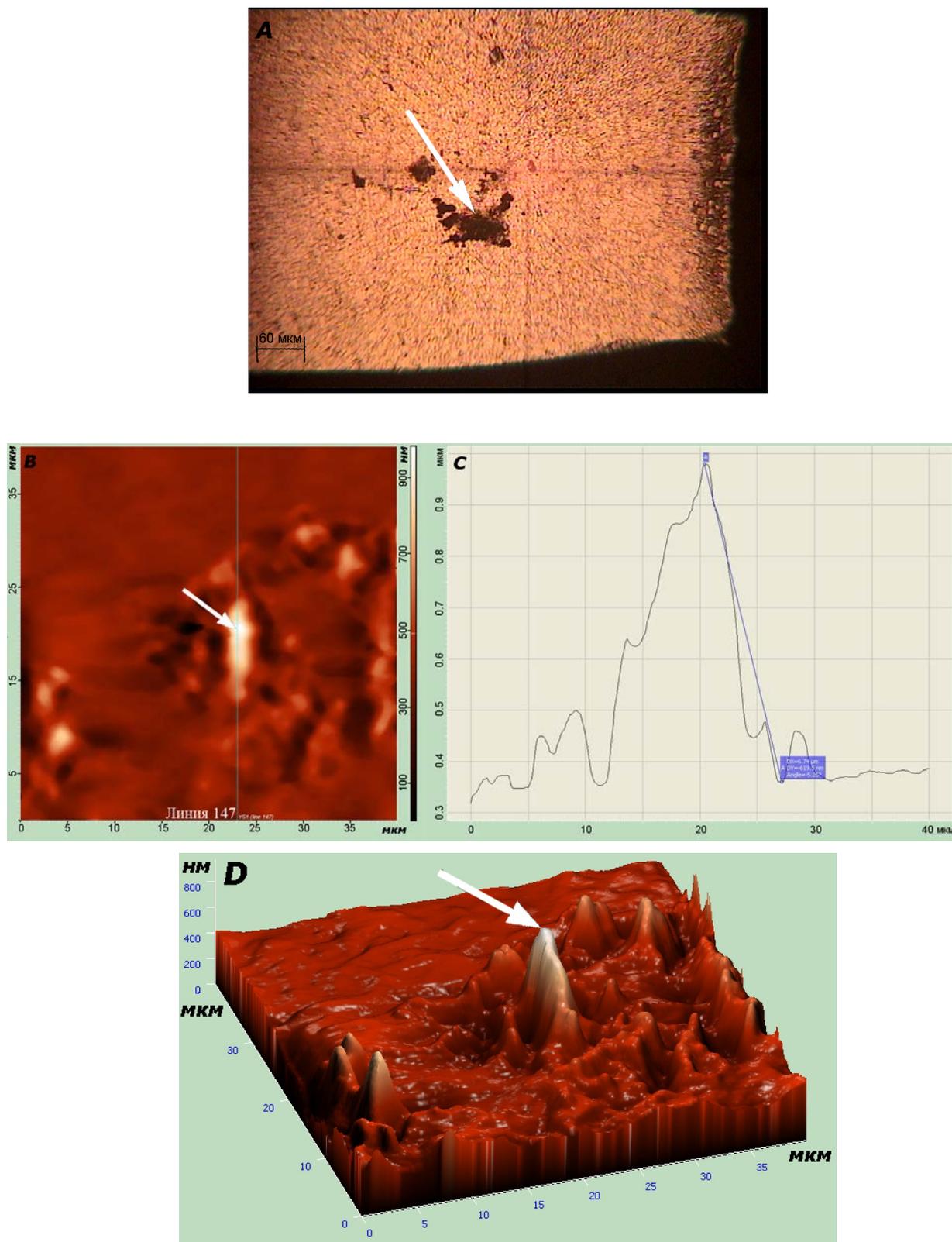


Рис. 19. Поверхность необработанной контакт-детали геркона МКА-14108 после $3 \cdot 10^7$ срабатываний в «сухой» цепи: (А) ОМ-изображение, увеличение 300X; (В) 2D-АСМ-изображение, (С) профилограмма поверхности вдоль линии 147, (D) 3D-АСМ-изображение

Контактная поверхность азотированных контакт-деталей, напротив, благодаря более высокой твердости азотированных слоев, оказалась более устойчивой к процессу эрозии, и поэтому сопротивление герконов в процессе коммутации остается стабильно низким (рис. 15, кривая 2).

Кроме этого, опытные образцы подвергались испытаниям на безотказность с активной нагрузкой по комбинированному режиму (рис. 20, 21).

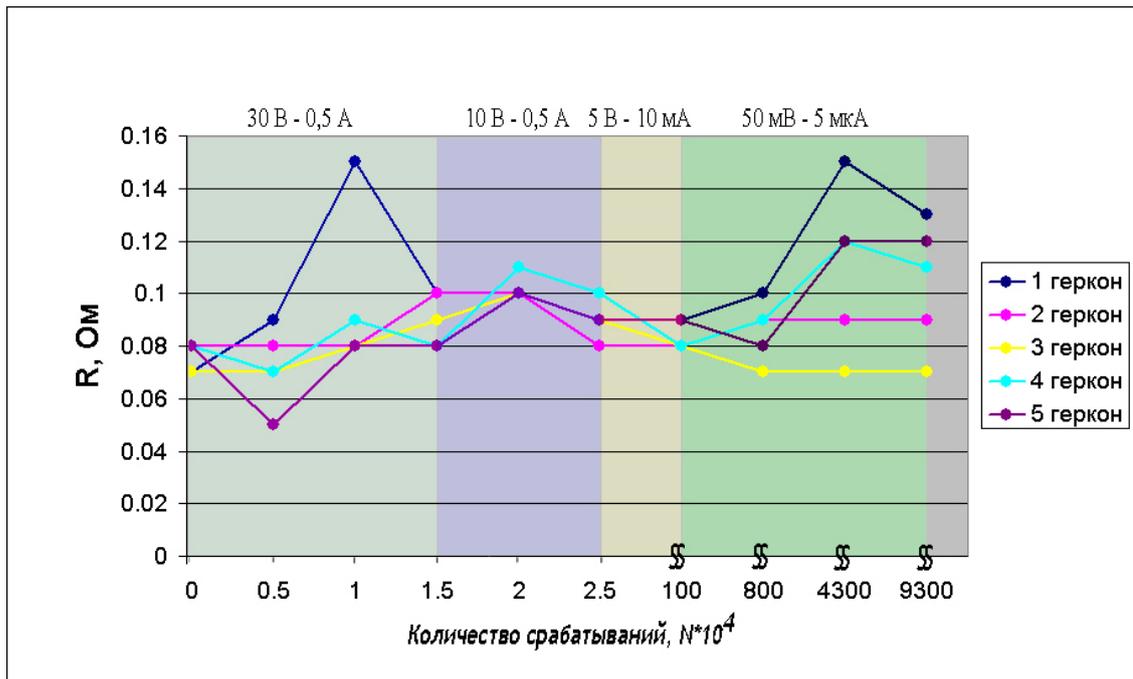


Рис. 20. Зависимость сопротивления R герконов МКА-14108 от количества срабатываний N в комбинированном режиме

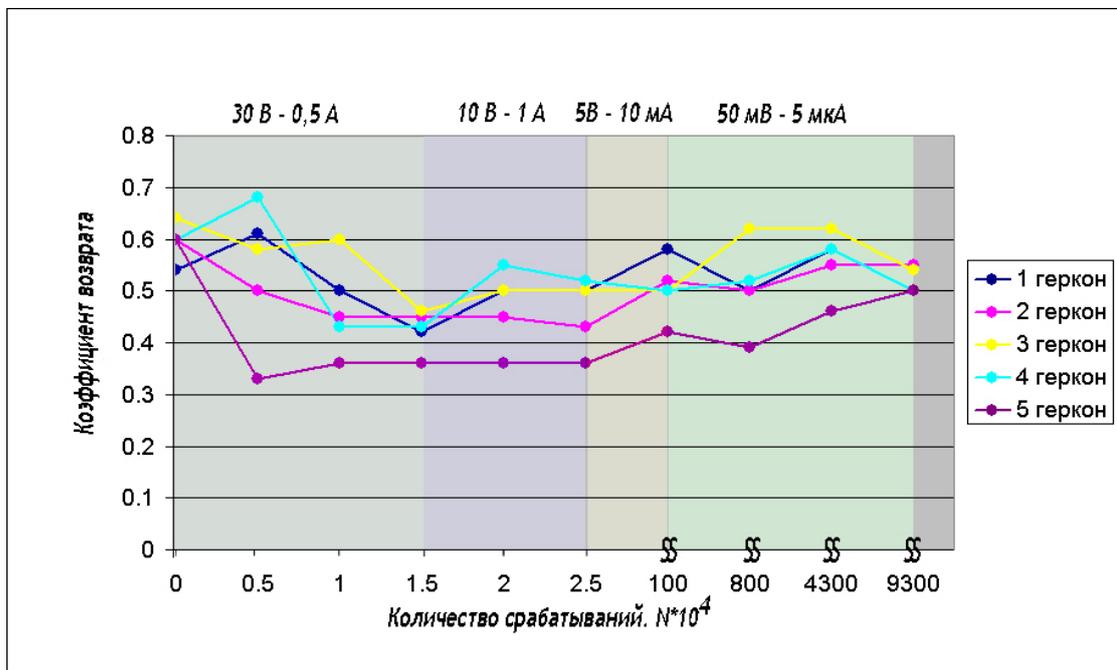


Рис. 21. Зависимость коэффициента возврата K герконов МКА-14108 от количества срабатываний N в комбинированном режиме

АСМ-изображения контактной поверхности, полученные методом реактивного катодного распыления до и после коммутации, представлены на рис. 12 и 22.

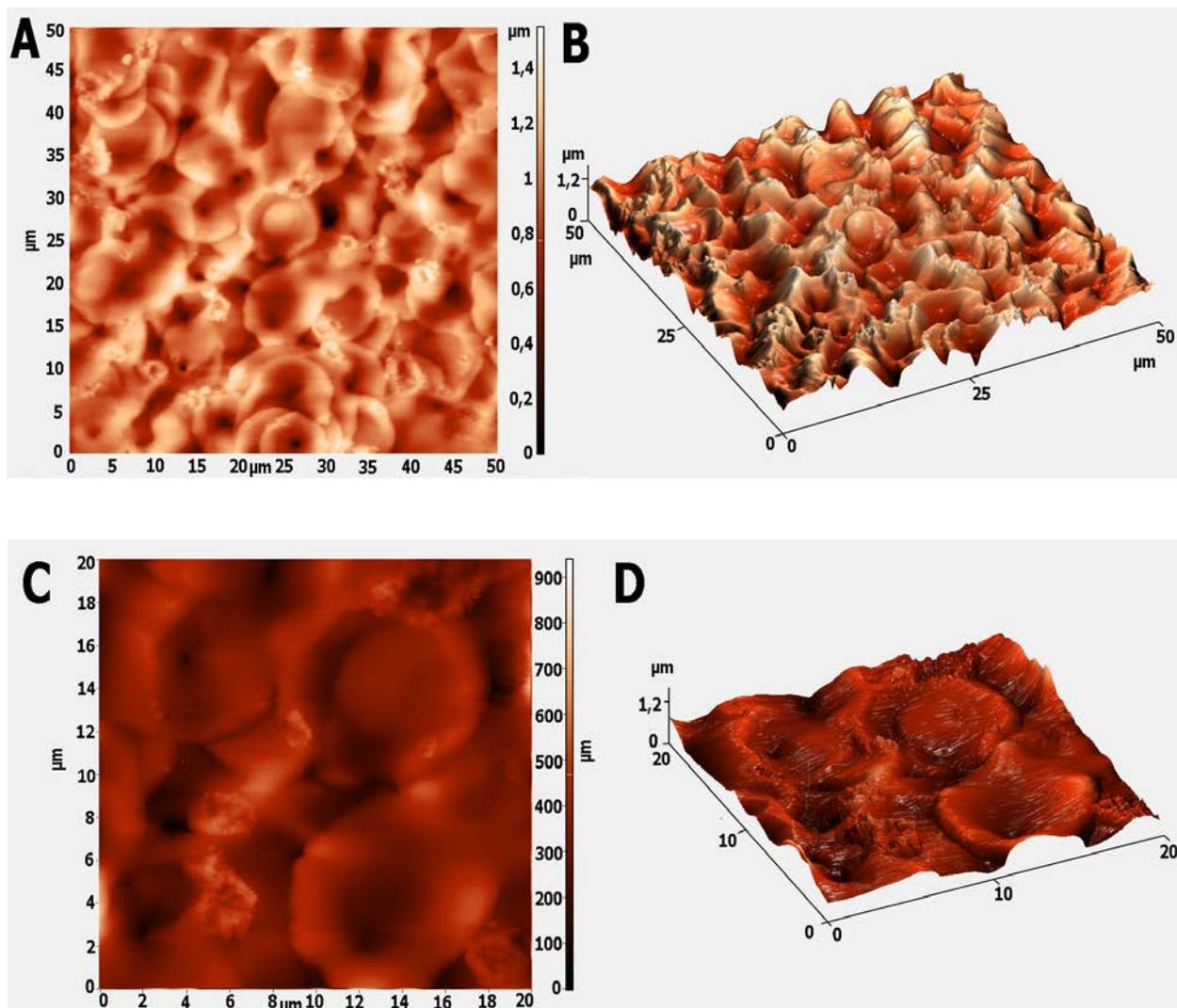


Рис. 22. 2D- и 3D- АСМ-изображение контактной поверхности геркона МКА-14108 (после ИПО в режиме реактивного катодного распыления и последующей коммутации в комбинированном режиме: (А), (В) 50х50 мкм; (С), (D) 20х20 мкм

За счет теплового действия дуги размыкания [1], возникающей в диапазоне от 0 до $2,5 \cdot 10^4$ срабатываний (рис. 20, 21), в контактных микропятнах происходит разогрев поверхности выше температуры кипения. Это приводит к интенсивному испарению металла. В результате, как видно по АСМ-изображениям (рис. 22), на поверхности контакт-деталей образуются конусоподобные кратеры диаметром около 8000 нм и глубиной около 100 нм.

Из рассмотрения экспериментальных кривых, изображенных на рис. 20-21, можно сделать вывод о полном соответствии осажденных покрытий требованиям [1], предъявляемым к покрытиям серийных герконов МКА-14103 по безотказности, величине и стабильности сопротивления.

Таким образом, коммутационные испытания на безотказность герконов с контактными покрытиями, изготовленными методом реактивного катодного распыления, дали положительный результат. Они подтвердили высокую адгезию пленки к материалу подложки. Прочность адгезионных связей, по-видимому, обусловлена дополнительной активацией поверхности действием плазмы.

4. Заключение

Разработан принципиально новый технологический процесс модификации контактирующих поверхностей магнитоуправляемых контактов (МК), состоящий в том, что после заварки контактных пружин в наполненный азотом стеклянный баллон через МК, находящиеся в разомкнутом состоянии, пропускают импульсы тока, которые и вызывают формирование в приповерхностной области МК микро- наноразмерных слоев с заданными контактными свойствами.

В результате проведенных исследований удалось обеспечить такие электрофизические условия разряда, при которых в приповерхностной области и на поверхности пермаллоевых контактов герконов методами ионного азотирования или реактивного катодного распыления формируются коррозионно- и эрозионно-устойчивые нитридные слои с высокой электропроводностью, что позволяет отказаться от применения гальванопокрытий, изготовленных из драгоценных металлов.

Таким образом, полученные результаты указывают на перспективность применения методов ионного азотирования и реактивного катодного распыления для производства герконов.

Литература

1. Карабанов С.М., Майзельс Р.М., Шоффа В.Н. Магнитоуправляемые контакты (герконы) и изделия на их основе. – Издательство «Интеллект», Долгопрудный, Россия, 2011.
2. Арзамасов Б.Н., Братухин А.Г., Елисеев Ю.С., Панайоти Т.А. Ионная химико-термическая обработка сплавов в газовой среде. – Издательство «МГТУ им. Н.Э. Баумана». – Москва, 1999.
3. Лященко Б.А., Мироненко В.И., Радько О.В., Бобырь С.А. Особенности азотирования стали 30ХГСА в пульсирующем разряде. – Издательство «Вісник Чекаського національного університету». – Черкассы, Украина, 2007. С. 107-110.
4. Зельцер И.А., Карабанов С.М., Майзельс Р.М., Моос Е.Н., Саблин В.А. Модификации поверхности герметизированных магнитоуправляемых пермаллоевых контактов импульсными разрядами. В сборнике трудов второй Международной научно-практической конференции «Магнитоуправляемые контакты (герконы) и изделия на их основе». – Издательство «Полиграф». – Рязань, 2009. С. 174-177.
5. Зельцер И.А., Карабанов С.М., Майзельс Р.М., Саблин В.А. Исследование и разработка методов модификации поверхности герметизированных магнитоуправляемых контактов. В сборнике трудов второй Международной научно-практической конференции «Магнитоуправляемые контакты (герконы) и изделия на их основе». – Издательство «Полиграф». – Рязань, 2009. С. 184-207.
6. Зельцер И.А., Карабанов С.М., Кузнецов А.А., Майзельс Р.М., Саблин В.А., Черняк Е.Я. Исследование ионно-плазменной модификации железоникелевых герметизированных магнитоуправляемых контактов методом электронной оже-спектроскопии. В сборнике трудов второй Международной научно-практической конференции «Магнитоуправляемые контакты (герконы) и изделия на их основе». – Издательство «Полиграф». – Рязань, Россия, 2009. С. 178-183.
7. Карпов А.С., Майзельс Р.М., Шишкина Л.В., Шкутенко Л.Н. Установка для автоматической ионно-плазменной обработки герконов. В сборнике трудов второй Международной научно-практической конференции «Магнитоуправляемые контакты (герконы) и изделия на их основе». – Издательство «Полиграф». – Рязань, Россия, 2009. С. 169-173.
8. Кузнецов А.А., Васильев Е.В., Зельцер И.А., Черняк Е.Я. Анализ элементного и химического состава контактных зон герконов методом ЭОС. В сборнике трудов

- второй Международной научно-практической конференции «Магнитоуправляемые контакты (герконы) и изделия на их основе». – Издательство «Полиграф». – Рязань, Россия, 2009. С. 84-87.
9. Арушанов К.А., Зельцер И.А. Аппаратурные и технологические аспекты создания герконов с наноструктурированными контактными поверхностями. Вестник РГРТУ 2009, 3, 93-98.
 10. Зельцер И.А., Карабанов С.М., Майзельс Р.М., Моос Е.Н., Саблин В.А. Модификация поверхности герметизированных магнитоуправляемых железоникелевых контактов. В тезисах докладов X Международного семинара «Структурные основы модификации материалов методами нетрадиционных технологий». – МНТ-Х; Обнинск, Россия, 2009. С. 58-59.
 11. Zeltser I.A., Karabanov S.M., Maizels R.M., Moos E.N., Sablin V.A. Nanostructure Modified Contact Surface. In Abstract Book of International Conference “Information and Structure in Nanoworld”. – Saint-Petersburg, Russia, 1-3 July, 2009. P. 83.
 12. Патент РФ № 2391733 . Магнитоуправляемый герметизированный контакт. / Карабанов С.М., Зельцер И.А., Майзельс Р.М., Трунин Е.Б.
 13. Патент РФ № 2393570 . Способ изготовления герконов с азотированными контакт-детальями. / Карабанов С.М., Майзельс Р.М., Арушанов К.А., Зельцер И.А., Провоторов В.С.
 14. Арушанов К.А., Зельцер И.А., Карабанов С.М., Маслаков К.И., Наумкин А.В. Исследование плазменной модификации магнитоуправляемых контактов методами рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии и атомно-силовой микроскопии. В: Материали за 7-а международна научна практична конференция Найновите постижения на европейската наука, Том. 36. Химия и химически технологии. Физика: Издательство «Бял ГРАД БГ», – София, Болгария, 2011. С. 56 – 61.
 15. Арушанов К.А., Зельцер И.А., Карабанов С.М., Майзельс Р.М., Моос Е.Н. Новый метод модификации контактных поверхностей герконов. В: Материали за 7-а международна научна практична конференция Найновите постижения на европейската наука, Том. 36. Химия и химически технологии. Физика: Издательство «Бял ГРАД БГ», – София, Болгария, 2011. С. 52–55.
 16. Арушанов К.А., Зельцер И.А., Карабанов С.М., Майзельс Р.М., Моос Е.Н. Формирование нанорельефа контактных поверхностей. В XI Международном семинаре Структурные основы модификации материалов. (М–НТ–ХI) Тезисы докладов, – ИАТЭ НИЯУ МИФИ, – Обнинск, Россия, 2011. С. 20-22.
 17. Арушанов К.А., Зельцер И.А., Карабанов С.М., Майзельс Р.М., Моос Е.Н. Ионно-индуцированное модифицирование контактных поверхностей. В материалах XX Международной конференции «Взаимодействие ионов с поверхностью». ВИП-2011, – Звенигород, Россия, 25-29 августа 2011, pp. 206-209.
 18. Арушанов К.А., Зельцер И.А., Карабанов С.М., Трунин Е.Б. Диффузионное насыщение азотом приповерхностных слоев контактов герконов в пульсирующей плазме. В сборнике тезисов третьей Международной научно-практической конференции «Магнитоуправляемые контакты (герконы) и изделия на их основе», – Рязань, Россия, 28-30 сентября 2011. С. 31-38.
 19. Авачев А.П., Арушанов К.А., Зельцер И.А., Карабанов С.М., Конобеев В.А. Исследование плазменной модификации поверхности магнитоуправляемых контактов методами атомно-силовой и оптической микроскопии. В сборнике тезисов третьей Международной научно-практической конференции «Магнитоуправляемые контакты (герконы) и изделия на их основе», – Рязань, Россия, 28-30 сентября 2011. С. 47-53.
 20. Арушанов К.А., Зельцер И.А., Карабанов С.М., Майзельс Р.М., Моос Е.Н. Новый метод

- модификации магнитоуправляемых контактов. В сборнике тезисов третьей Международной научно-практической конференции «Магнитоуправляемые контакты (герконы) и изделия на их основе», – Рязань, Россия, 28-30 сентября 2011. С. 54-60.
21. Арушанов К.А., Зельцер И.А., Карабанов С.М., Маслаков К.И., Наумкин А.В. Исследование ионно-плазменной модификации поверхности железоникелевых магнитоуправляемых контактов методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. В сборнике тезисов третьей Международной научно-практической конференции «Магнитоуправляемые контакты (герконы) и изделия на их основе», – Рязань, Россия, 28-30 сентября 2011. С. 39-46.
 22. Журавлев С.А., Зельцер И.А., Майзельс Р.М., Поляков А.С., Черняк Е.Я. Анализ химического состава газа внутри герконов. В сборнике тезисов третьей Международной научно-практической конференции «Магнитоуправляемые контакты (герконы) и изделия на их основе», – Рязань, Россия, 28-30 сентября 2011. С. 68-69.
 23. Арушанов А.К., Зельцер И.А., Кузнецов А.А., Черняк Е.Я. Применение метода электронной оже-спектроскопии для исследования плазменной модификации магнитоуправляемых контактов. В сборнике тезисов третьей «Международной научно-практической конференции Магнитоуправляемые контакты (герконы) и изделия на их основе», – Рязань, Россия, 28-30 сентября 2011. С. 61-67.
 24. Дроздов М.Н., Зельцер И.А., Карабанов С.М., Теодору О.М.Н.Д. Применение метода масс-спектрометрии вторичных ионов для исследования ионно-плазменной модификации. В третьей международной научно-практической конференции «Магнитоуправляемые контакты (герконы) и изделия на их основе», – Рязань, Россия, 28-30 сентября 2011. С. 129-133.
 25. Karabanov S.M., Zeltser I.A., Maizels R.M., Moos E.N., Arushanov K.A. Creation of Principally New Generation of Switching Technique Elements (Reed Switches) with Nanostructured Contact Surfaces. *Journal of Physics: Conference Series*, 2011, v. 291, No. 01 2020, pp. 1-17.
 26. Чаттерджи-Фишер Р., Эйзелл Ф.-В. Азотирование и карбонитрирование. Под ред. Супова А.В. – Издательство «Металлургия»: Москва, Россия, 1990, 280 с.
 27. Kuznetsov A.A., Abramova S.Yu., Potapova T.E., Protopopov O.D. *Journ. of Electron Spectr. and Rel. Phenom* 1994, v. 68, pp. 407-412.
 28. Беграмбеков Л.Б. Модификация поверхности твердых тел при ионном и плазменном воздействии. МИФИ, – Москва, Россия, 2001.