# ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ НАМАГНИЧИВАНИЯ ПЕРМАЛЛОЕВЫХ КОНТАКТ-ДЕТАЛЕЙ ГЕРКОНА МКА-14103

В.С. Провоторов, Л.Н. Шкутенко, С.А. Колесова 390027, Россия, г. Рязань, ул. Новая, 51В, ОАО «РЗМКП»

Определен интервал времени, в котором замечено влияние магнитной вязкости пермаллоевых контакт-деталей геркона на динамику их намагничивания.

The time range, in which the influence of magnetic viscosity of Permalloy contact pieces of the reed switch on the dynamics of magnetization thereof is detected, has been determined.

Идея академика А.А. Чернышева о совмещении в одной детали функции возвратной пружины, электрического контакта и магнитопровода была реализована Элвудом в 1939 г. при разработке первого герметизированного магнитоуправляемого контакта (геркона) [1].

Геркон, согласно новейшим научно-техническим публикациям [2], является сложной магнитомеханической системой и представляет собой разомкнутую цепь из двух электропроводных магнитопроводов, заваренных в торцах стеклянного баллона и образующих зазор в месте взаимного перекрытия контактирующих концов магнитопроводов.

Уникальное сочетание технических параметров и возможность управления герконом, как от соленоидальной обмотки, так и от постоянного магнита, позволило сохранить стабильный рынок сбыта даже в условиях бурного роста микроэлектроники (твердотельных реле).

Продажа герконов на мировых рынках с учетом требований потребителя привели к снижению диапазона допустимого разброса в поставляемой партии герконов по магнитодвижущей силе срабатывания ( F<sub>cp</sub>) до 2 А.

Чтобы предотвратить «засорение» партии герконами с пограничными значениями F<sub>cp</sub>, необходимо учитывать динамику временного дрейфа F<sub>cp</sub> у герконов.

Как известно [1], контакт-детали геркона изготавливаются из пермаллоевого сплава 52H-ВИ путем плющения половины контакт-детали до нужной конфигурации. Именно на участке плющения происходит механическое разрушение кристаллической структуры, которая даже после магнитного отжига при температуре 920 °C с выдержкой при максимальной температуре в течение 1 часа существенно отличается от кристаллической структуры неповрежденной круглой части, являющейся выводом геркона.

При измерении F<sub>cp</sub> геркона через круглые вывода замыкается только часть магнитного потока катушки измерения, а наибольший магнитный поток проходит через два деформированных участка с нарушенной кристаллической структурой.

Исходная структура проволоки формируется в процессе дендритной кристаллизации расплавленного металла в изложнице и прокатки слитка в заготовку для последующего волочения через дюзы до получения проволоки нужного диаметра. При волочении происходит смещение верхних слоев проволоки и в процессе проведения промежуточных отжигов, необходимых для снятия механических напряжений в нагартованных верхних слоях, не устраняются нарушения кристаллической структуры.

После штамповки и магнитного отжига деформированные участки контакт-детали представляют конгломерат доменных структур с хаотическим пространственным расположением осей легкого намагничивания.

Кроме того, в контакт-детали имеются многочисленные межкристаллические дислокации, примесные включения и кристаллы с различным фазовым составом. Рекристаллизация фазовых структур происходит за длительный срок, тогда как время, за которое происходит ориентация и дезориентация магнитных доменов, намного меньше, и это явление в физике магнетизма известно под термином «магнитная вязкость». Известно, что магнитная вязкость оказывает влияние в течение времени от нескольких секунд до нескольких лет.

Явление «магнитная вязкость», согласно [3], заключается в том, что при намагничивании ферромагнетика в области слабых полей (где, как правило, и наблюдается это явление) мы имеем в основном процессы смещения границ между доменами. При смещении границ из-за магнитострикции возникают внутренние напряжения. Их равновесное распределение устанавливается не сразу, а благодаря механическому последействию, с конечной скоростью. В более пластичных материалах с большим временем релаксации для механического последействия следует ожидать и более развитого явления магнитного последействия. При этом на условия равновесия границ между доменами могут оказывать влияние такие процессы, как диффузия примесей, распад твердых растворов, явление упорядочения атомов в кристаллической решетке сплавов и т.п.

Также в [3] дается и другое объяснение этого явления, которое не связывает его с магнитными и механическими параметрами кристалла, а основывается на предположении о связи этого явления с упругим последействием. Границы между доменами после размагничивания попадают в некоторые «свежие» места кристаллической решетки металла. Из-за неоднородности намагниченности в этих граничных слоях возникают заметные градиенты магнитострикционных напряжений. В такие места кристалла с большими градиентами напряжений должна идти заметная диффузия примесей в кристалле. Эта диффузия вызывает заметное перераспределение внутренних напряжений, и можно ожидать, что граница между доменами «продавит» себе со временем более глубокую «потенциальную яму». Для смещения границы из этой «ямы» требуются большие поля, что со временем приводит к уменьшению проницаемости.

Для оценки этого явления авторы попытались разработать методику эксперимента и провели измерения с использованием установки измерения коэрцитивной силы. Установка, содержащая стабилизированный блок управления, измерительный блок и прецизионный усилитель постоянного тока, предназначена для контроля эффективности магнитного отжига пермаллоевых контакт-деталей. Измерение коэрцитивной силы производится по петле гистерезиса на одной контакт-детали, находящейся полной В центре намагничивающей обмотки с ручной регулировкой как величины, так и полярности пропускаемого тока. Величина потокосцепления с контакт-деталью, характеризирующая намагниченность для данного поля, преобразовывалась в аналоговый сигнал напряжения, наводимого в измерительной обмотке, совершающей периодические перемещения над центром контакт-детали. После детектирования напряжение сигнала от измерительной обмотки поступало на вход прецизионного усилителя постоянного тока и фиксировалось микровольтметром. Погрешность измерения установки не превышала 5 %. По методикам, представленным на рис.1 и 2, исходное магнитное состояние контакт-детали создавалось двумя способами.

В первом способе (рис. 1) контакт-деталь размагничивалась (точка 1), помещалась в измерительную катушку и намагничивалась до максимально возможного значения поля отрицательной полярности (точка 2). После чего поле снижалось до 0 (точка 3) и от точки 3 включался секундомер, по которому отсчитывалось время задержки до измерения в конкретном поле напряженностью в 600 А/м, которое находится вблизи максимума магнитной проницаемости пермаллоя. Подъем поля от точки 3 до точки 4 проходил как скачкообразно (помещение контакт-детали в катушку с заранее установленным полем 600 А/м), так и плавно (не вынимая контакт-деталь из измерительной катушки) до этого же значения (600 А/м).



Рис. 1. Первый способ намагничивания по всей петле гистерезиса

Во втором способе (рис. 2) контакт-деталь размагничивалась (точка 1), помещалась в измерительную катушку и намагничивалась до максимально возможного значения поля положительной полярности (точка 2). После чего поле снижалось до нуля (точка 3). Дальнейшая последовательность измерений от точки 3 до точки 4 проводилась аналогично первому способу.

Измерения проводились на двух контакт-деталях с разными режимами магнитного отжига:

- контакт-деталь № 1 (МАГПАЗ 730 °С, 35', 52Н-ВИ)
- контакт- деталь № 2 (920 °С, 1час, 52Н-ВИ).



Рис. 2. Второй способ намагничивания по половине петли гистерезиса

Результаты измерений процессов намагничивания контакт-детали (к/д) от точки 1 до точки 4 (первый способ – рис. 1) и от точки 3 до точки 4 (второй способ – рис. 2) сведены соответственно в табл. 1 и 2 и отображены на рис.3 и 4. Для проведения дальнейшей работы

был выбран первый способ измерения, поскольку он позволяет выявить самые незначительные изменения, связанные с явлением магнитной вязкости.

Таблица 1

### Результаты измерений процессов намагничивания к/д № 1

# а) по первому способу (от точки 1 до точки 4 – рис. 1)

	к/д помещается в установленное поле 600 А/м													
<i>t</i> , МИН.	0	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	2,25	4,25	7,25	12,25	22,25	37,25	67,25	
U, мкВ	8,4	8,25	8,35	8,3	8,4	8,5	8,35	8,2	8,0	8,4	8,65	8,75	8,35	
для каждого измерения поле изменяется от 0 до 600 А/м														
U, мкВ	7,95	8,0	8,0	8,0	8,0	8,1	8,0	8,1	8,0	8,2	8,0	7,8	7,85	
	к/д помещается в установленное поле 600 А/м													
U, мкВ	8,25	8,2	8,2	8,3	8,15	8,1	8,15	8,0	8,35	7,85	8,4	8,7	8,5	
	для каждого измерения поле изменяется от 0 до 600 А/м													
U, мкВ	8,1	8,1	8,15	8,15	8,05	8,3	8,15	8,0	8,05	8,2	8,35	8,3	8,1	

б) по второму способу (от точки 3 до точки 4 – рис. 2)

	к/д помещается в установленное поле 600 А/м												
t, мин.	0	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	2,25	4,25	7,25	12,25	22,25	37,25	67,25
U, мкВ	7,45	7,25	7,2	7,35	7,35	7,25	7,45	7,25	7,45	7,55	7,35	7,1	7,2
	для каждого измерения меняем поле от 0 до 600 А/м												
U, мкВ	6,8 6,8 6,75 6,75 6,85 6,9 6,9 6,75 7,0 7,1 7,0 7,35 7,35												

Таблица 2

# Результаты измерения процессов намагничивания к/д № 2

# а) по первому способу (от точки 1 до точки 4 – рис. 1)

	к/д помещается в установленное поле 600 А/м												
t, мин.	0	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	2,25	4,25	7,25	12,25	22,25	37,25	67,25
U, мкВ	8,25	8,6	8,35	8,55	8,5	8,6	8,45	8,45	8,5	8,55	8,6	8,6	8,75
	для каждого измерения поле изменяется от 0 до 600 А/м												
U, мкВ	8,7 8,7 8,6 8,6 8,7 8,8 8,75 8,6 8,7 8,75 8,7 8,9											8,4	

	к/д помещается в установленное поле 600 А/м												
t, мин.	0	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	2,25	4,25	7,25	12,25	22,25	37,25	67,25
U, мкВ	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,45	8,3	8,25	8,35	8,3	8,3	8,6	8,35
	для каждого измерения поле изменяется от 0 до 600 А/м												
U, мкВ	8,25	8,3	8,2	8,2	8,3	8,3	8,55	8,5	8,1	8,2	8,45	8,35	8,6

### б) по второму способу (от точки 3 до точки 4 – рис. 2)



Рис. 3. Результаты измерений согласно рис. 1 и 2

Предварительное намагничивание до тах на (+) и замеры на (+)

- 1 к/д помещается в установленное поле 600 А/м
- 2 для каждого измерения меняем поле от 0 до 600 А/м
- 3 к/д помещается в установленное поле 600 А/м
- 4 для каждого измерения меняем поле от 0 до 600 A/м

Предварительное намагничивание до тах на (-) и замеры на (+)

- 5 к/д помещается в установленное поле 600 А/м
- 6 для каждого измерения меняем поле от 0 до 600 А/м



Рис. 4. Результаты измерений согласно рис. 1 и 2

Предварительное намагничивание до тах на (+) и замеры на (+)

1 к/д помещается в установленное поле 600 А/м

- 2 для каждого измерения меняем поле от 0 до 600 А/м

Предварительное намагничивание до тах на (-) и замеры на (+)

- 3 к/д помещается в установленное поле 600 А/м
- 4 для каждого измерения меняем поле от 0 до 600 А/м

Для каждого времени задержки произведено (точка 4 на рис. 1) по 5 измерений. Результаты измерений сведены в табл. 3 и 4 и отображены на рис. 5.

Таблица 3

## Контакт-деталь № 1 (МАГПАЗ 730 °С, 35' 52Н-ВИ)

Предварительное намагничивание до max на (-) и замеры на (+) при H = 600 А/м

t =1	t =1 мин.		t = 2 мин.		t = 3 мин. t		t = 4 мин.		t = 5 мин.		t = 10 мин.		t = 15 мин.	
U, 1	мкВ	U, 1	икВ	U, 1	мкВ	U, 1	мкВ	U, 1	икВ	U, 1	икВ	U, 1	икВ	
7,8	7,8	7,8	7,8	7,95	8,0	8,1	7,95	8,15	8,2	8,25	8,2	8,1	8,2	
7,9	7,8	7,85	7,8	8,0	7,85	7,9	7,95	8,15	8,2	8,25	8,3	8,25	8,3	
7,85	7,95	8,0	7,9	7,9	8,0	8,0	8,0	8,2	8,25	8,25	8,2	8,65	8,6	
7,65	7,5	8,0	7,9	7,9	7,85	8,05	7,95	8,35	8,3	8,35	8,45	7,85	7,7	
7,2	7,35	8,0	8,1	7,8	7,85	8,0	8,0	8,25	8,1	8,15	7,95	7,7	7,95	

Таблица 4

Контакт-деталь № 2 (920 °С, 1 час 52Н-ВИ)

Предварительное намагничивание до max на (-) и замеры на (+) при H = 600 А/м

t =1	=1 мин. t = 2		МИН.	t = 3 мин.		t = 4 мин.		t = 5 мин.		t =10 мин.		t =15 мин.	
U, 1	мкВ	U, 1	мкВ	U, 1	икВ	U, 1	икВ	U, 1	икВ	U, 1	икВ	U, 1	мкВ
8,1	8,1	8,1	8,0	8,2	8,2	8,2	8,15	8,6	8,7	9,0	9,1	9,2	9,2
8,05	8,0	8,0	8,1	8,5	8,4	8,55	8,5	8,35	8,7	9,15	9,15	9,0	9,0
7,95	8,1	8,05	8,1	8,35	8,15	8,15	8,2	8,4	8,7	9,05	9,05	8,75	8,95
8,05	8,05	8,05	8,2	8,35	8,45	8,1	8,7	9,0	9,0	9,0	9,0	9,2	9,25
8,1	8,05	8,25	8,25	8,65	8,3	8,45	8,5	9,2	9,2	9,1	9,0	9,4	9,3



Рис. 5. Результаты измерений согласно рис. 1: 1 и 2 – контакт-деталь № 1 (МАГПАЗ 730 °С, 35' 52H-ВИ); 3 и 4 – контакт-деталь № 2 (920 °С, 1час 52H-ВИ)

На основании табл. 3 и 4 для каждого времени задержки оценивалось отклонение среднего значения намагниченности контакт-деталей относительно исходного состояния (исходное значение оценивалось по результатам 35 измерений для времени задержки от 1 до

15 мин.). Отклонение для конкретного времени задержки оценивалось по результатам 5 замеров. Результаты вычисленной девиации (Δ, мкВ), характеризующей магнитную вязкость, представлены на рис. 6.



Рис. 6. Результаты измерений согласно рис. 1: контакт-деталь № 1 (МАГПАЗ 730 °С, 35' 52H-ВИ); контакт-деталь № 2 (920 °С, 1 час 52H-ВИ)

Предлагается следующее объяснение. В процессе намагничивания контакт-детали геркона можно рассматривать как магнитный диполь, северный и южный полюс которого находится на разных концах. После снятия магнитного поля происходят обратимые и необратимые процессы перемагничивания и приведения энергетической системы диполя к нулю в результате исчезновения полюсов. Этот процесс и обусловлен магнитной вязкостью. Точка перехода через 0 (t = 4-5 мин.), представленная на рис. 6, как раз и характеризует время обратимой переориентации доменов. Необратимые изменения происходят на большем отрезке времени и связаны с рекристаллизацией неустойчивых структур в пермаллое и взаимной диффузии дислокаций после операции штамповки и отжига.

Подтверждение полученных результатов измерений на отдельных контакт-деталях проводилось на 5 герконах МКА-14103 без гальванопокрытия. До заварки в стеклянный баллон контакт-детали подвергались отжигу в атмосфере водорода при температуре 920 °С в течение 1 часа. Измерение  $F_{cp}$  у геркона с фиксированной задержкой после окончания намагничивания проводилось как в соответствии с ГОСТ 25810 [4], так и с отклонениями, имитирующими переворот геркона относительно первоначального положения в измерительной катушке. На рис. 7 проиллюстрирована методика измерения  $F_{cp}$  по ГОСТ 25810, отличающаяся тем, что с момента времени  $t_0$  (после намагничивания в поле  $F_{H}=2,2$   $F_{cp}$ , выдержки и снижения F до нуля) устанавливалось и фиксировалось по секундомеру время задержки ( $t_3$ ) до момента начала измерения  $F_{cp}$ -  $t_{hu}$ .



Рис. 7. Методика измерения  $F_{cp}$  по ГОСТ 25810:  $t_o$  – время начала отсчета;  $t_3$  – время задержки;  $t_{HH}$  – время начала измерения

На рис. 8 представлены результаты измерений F<sub>ср</sub> в соответствии с рис. 7 для герконов, намагниченных согласно рис. 2.



Рис. 8. Результаты измерений F<sub>ср</sub> согласно рис. 7

Имитация способа намагничивания согласно рис. 1 проводилась на тех же герконах по методике измерения, представленной на рис. 9.



Рис. 9. Методика измерения  $F_{cp},$ имитирующая намагничивание согласно рис. 1:  $t_o$  – время начала отсчета;  $t_{_3}$  – время задержки;  $t_{_{\rm HH}}$  – время начала измерения

Это достигалось тем, что после намагничивания в поле F = 2,2  $F_{cp}$  в промежутке времени от  $t_o$  до  $t_{ни}$  геркон вынимался из измерительной катушки и помещался в нее в перевернутом на 180° от исходного положения, что позволяло, используя одну и ту же установку OM-472M, изменить полярность управляющего поля. Результаты измерения  $F_{cp}$  в соответствии с рис. 9 представлены на рис. 10.



Рис. 10. Результаты измерений F<sub>ср</sub> согласно рис. 9

Имитация случая повторной разбраковки по F<sub>cp</sub> согласно ГОСТ 25810 с переворотом герконов на 180° представлена на рис. 11, а результаты измерений – на рис. 12. Наблюдаемые в течение 10 минут у большинства герконов разнополярные хаотические изменения F<sub>cp</sub>,

превышающие по значению допустимые пределы точности измерений установки OM-472M, могут привести к забраковыванию партий герконов с узкими диапазонами допустимых значений F<sub>сp</sub>.



Рис. 12. Результаты измерения F<sub>ср</sub> согласно рис. 11

Результаты проделанной работы могут быть использованы при анализе герконов с узким диапазоном по  $\mathrm{F}_{\mathrm{cp}}.$ 

#### Выводы

1. Получены экспериментальные подтверждения зависимости магнитных свойств пермаллоевых контакт-деталей от времени, что является одним из основных параметров, характеризующих явление магнитной вязкости.

2. Середина отрезка времени обратимых изменений магнитных свойств для пермаллоевых сплавов с различными отжигами находится в диапазоне 4-5 мин.

3. Необратимые изменения магнитных свойств, сказывающиеся на более длительном отрезке времени (до нескольких лет) подтверждаются систематическим уходом F<sub>ср</sub>.

4. Повторные измерения F<sub>ср</sub> у зарекламируемых герконов рекомендуется проводить через 15-20 минут.

#### Литература

- 1. Рабкин Л.И., Евгенова И.Н. Магнитоуправляемые герметизированные контакты. М., Связь, 1976.
- 2. Карабанов С.М., Майзельс Р.М., Шоффа В.Н. «Магнитоуправляемые контакты (герконы) и изделия на их основе». Издательский дом «Интеллект», Долгопрудный 2011.
- 3. Вонсовский С.В. Магнетизм. М., Наука, 1971.
- 4. ГОСТ 25810 «Контакты магнитоуправляемые герметизированные. Методы измерения электрических параметров». Государственный комитет СССР по стандартам, Москва. 1983.