

Некоторые особенности конструкции и материалов автомобильных датчиков кислорода

Рассадин М.Ю., ООО «НПП «ИТЭЛМА»

Числов А.С., к.ф.-м.н., Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН



ИОФ РАН

ИТЭЛМА®
Электронные
решения

Предпосылки

1. Активное замещение компонентов компаний, прекративших поставки в Россию
2. Изучение конструкций компонентов, поставляемых новыми поставщиками
3. Накопление опыта по методикам испытаний и анализу испытаний компонентов

ДК, представленные на испытания

Тип ДК, представленных на испытания: планарный узкополосный датчик кислорода с герметичной камерой эталонного газа. В исследовании обозначены NoName V#

Фото образца	Условное обозначение	История использования узла
	V1	Использовался на моторном стенде
	V2	Использовался на автомобиле, пробег до поломки по данным испытателей около 3000 км (примерно 50 моточасов)
	V3	Использовался на автомобиле, пробег до поломки по данным испытателей около 3000 км (примерно 50 моточасов)
	V4	Использовался на автомобиле, пробег до поломки по данным испытателей около 3000 км (примерно 50 моточасов)

Результаты испытаний на воздухе

Условное обозначение	Сопротивление нагревателя	Время активации	Сопротивление ЭХЯ	Обратный ток накачки	Результат проверки
V1	9,04 Ом	Не определено	50 МОм	Не определено	NOK
V2	10,23 Ом	4,72 с	75 Ом	44 мкА	NOK
V3	8,42 Ом	Не определено	47 МОм	49 мкА	NOK
V4	9,11 Ом	Не определено	50 МОм	Не определено	NOK

Все ДК показали неисправность чувствительного элемента. Нагреватели всех ДК исправны.

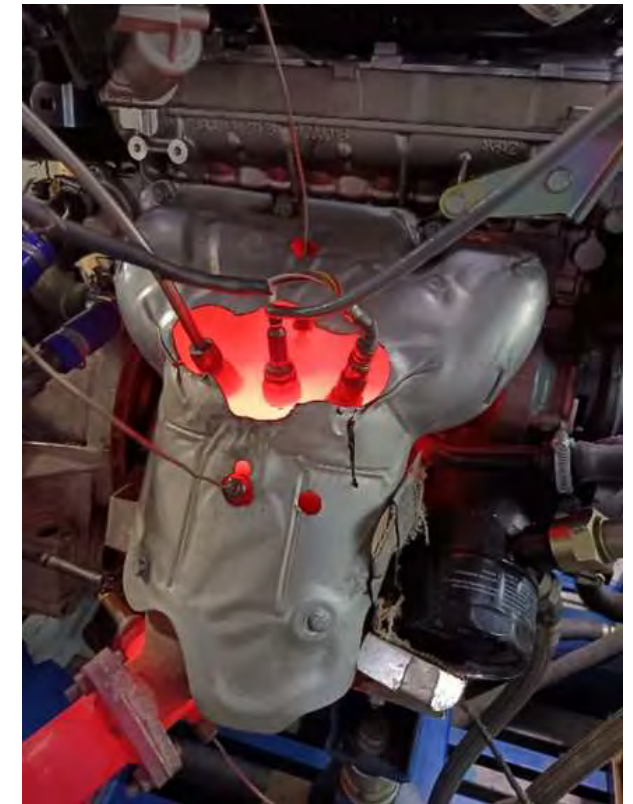
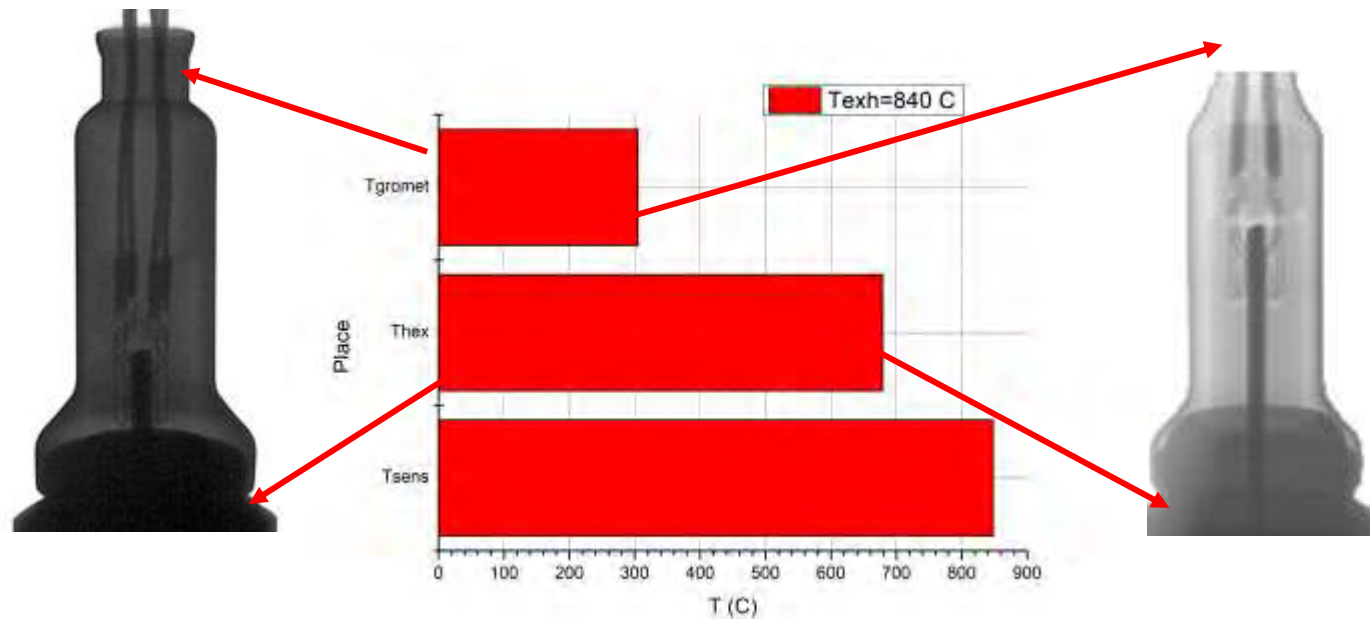
Контрольные параметры

1. Собственное сопротивление датчика кислорода на воздухе не более 5000 Ом
2. Время активации измерительного элемента не более 8 с
3. Сопротивление нагревателя от 8,1 до 11,1 Ом
4. Обратный ток накачки камеры эталонного газа датчика кислорода от 10 мкА до 50 мкА

Рентгеновское исследование ДК и распределение температур по длине ДК при работе на двигателе

Образец из группы NoName V#

Образец BrandName



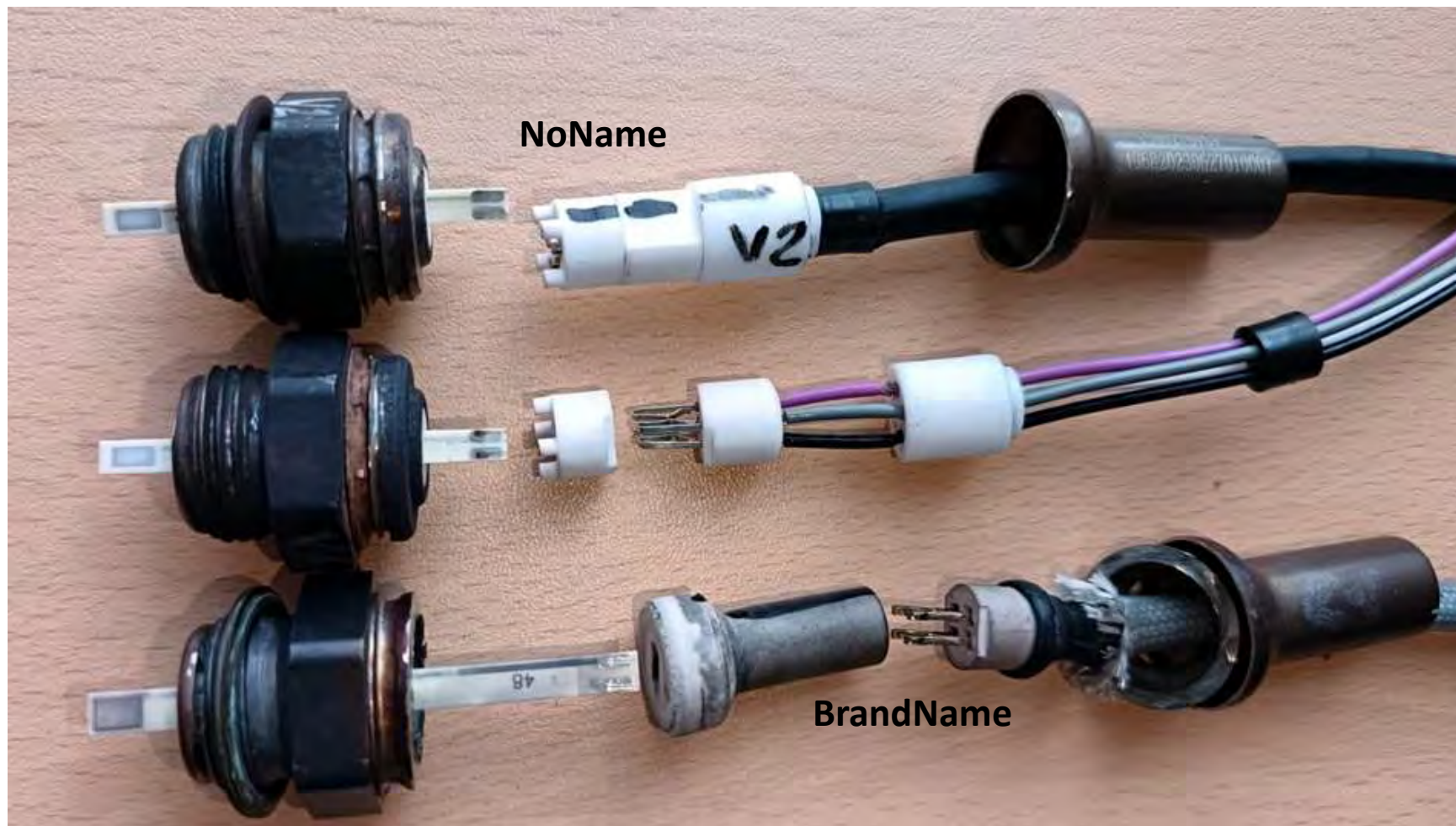
Чувствительный элемент ДК NoName существенно короче, чем у ДК BrandName.

Длина проводов от хвостовика чувствительного элемента до заделки корпуса существенно отличается.

Возможны колебания с большей амплитудой, которые могут привести к истиранию элементов контактной группы.

Контактная группа ДК NoName расположена ближе к горячему газу, температура контактной группы выше, в связи с чем контакты работают в менее благоприятных условиях.

Разборка ДК NoName и BrandName



Термическая деформация чувствительного элемента



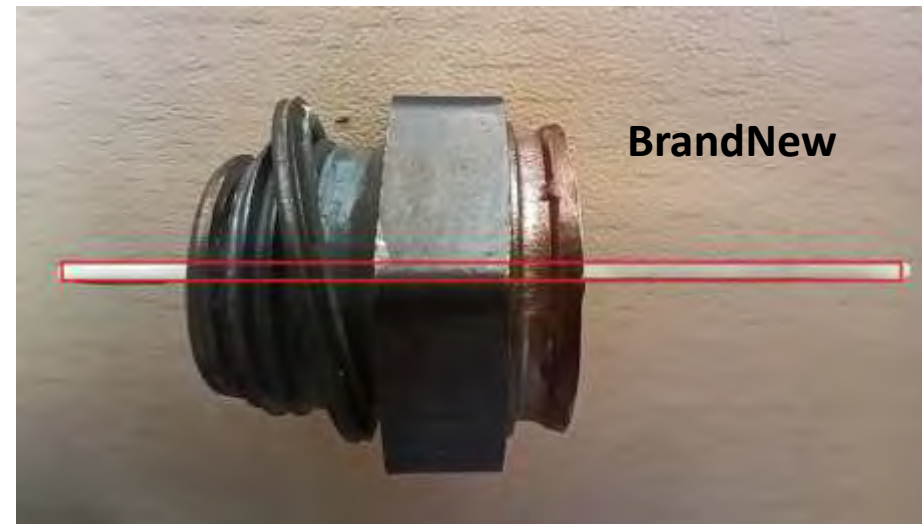
NoName V2



NoName V3



NoName V4



BrandNew



NoName V5

Новый, в эксплуатации не был

Микроскопическое исследование группы NoName (эксплуатация примерно 50 моточасов)

Электрод и дорожка электрода



V2



V3



V4



V5 New

Контакты чувствительного элемента



V2



V3



V4



V5 New

Контакты нагревателя



V2



V3



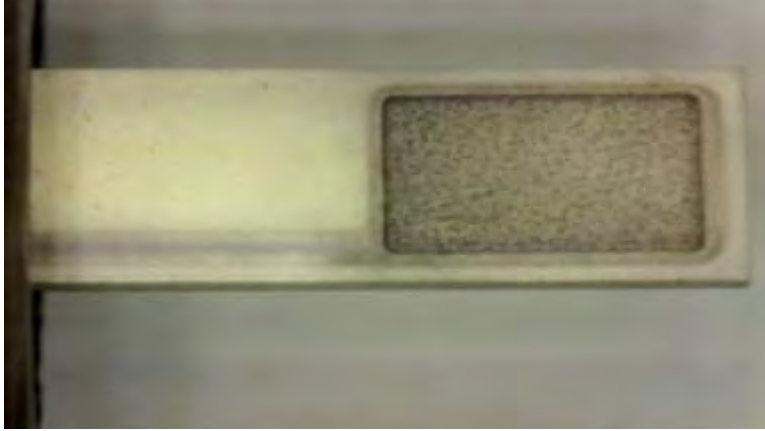
V4



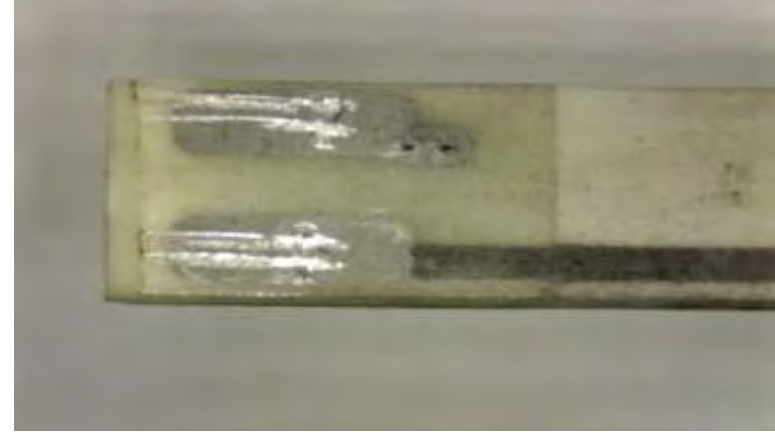
V5 New

Микроскопическое исследование ДК BrandName

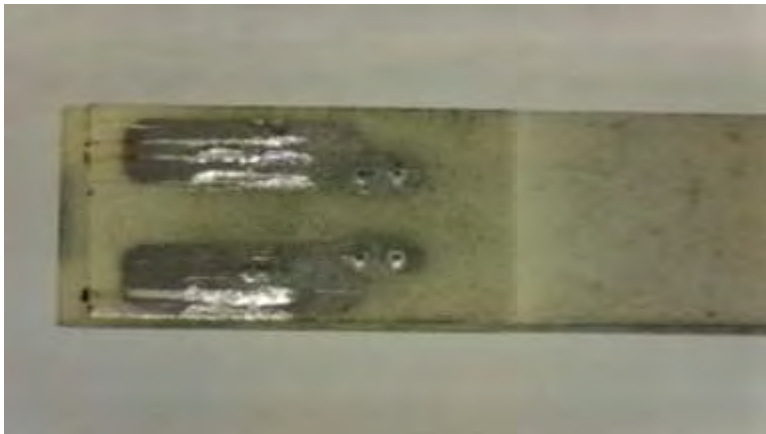
(эксплуатация примерно 50 моточасов)



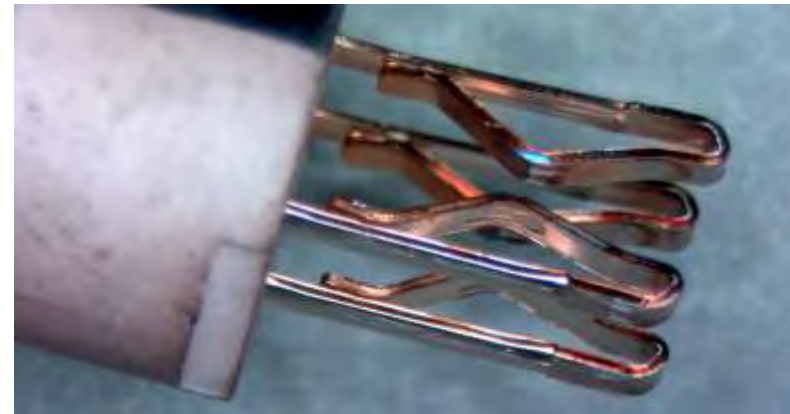
Электрод и дорожка электрода



Контактная группа чувствительного элемента

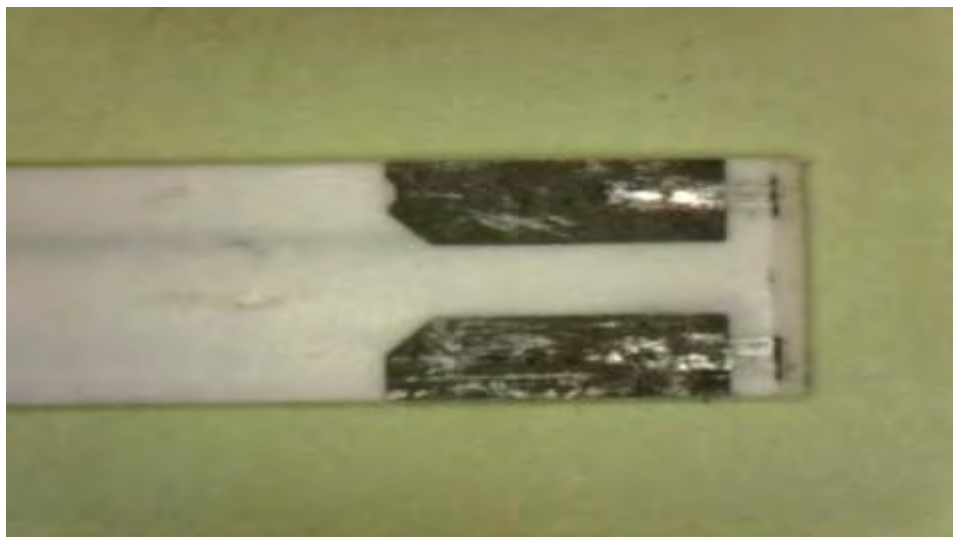


Контактная группа нагревателя

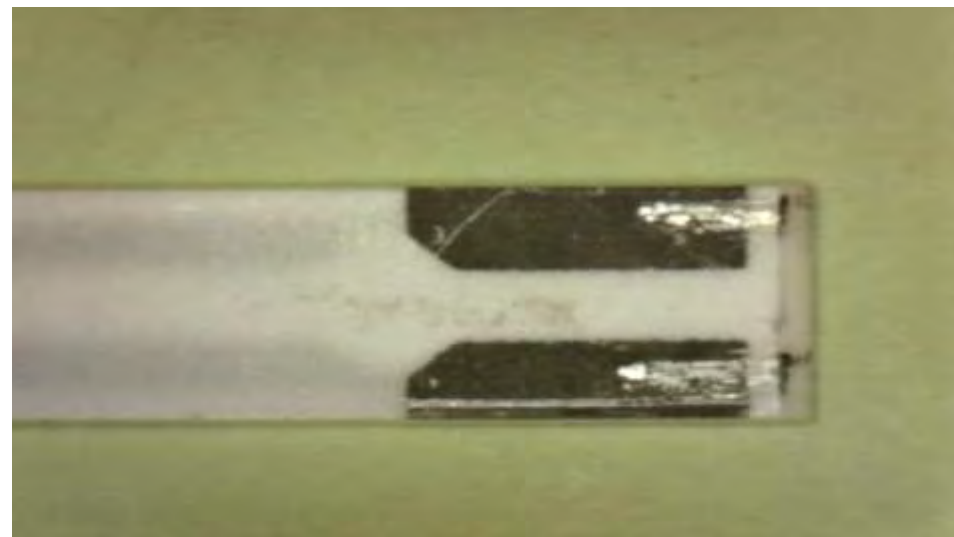


Контакты

Микроскопическое исследование ДК DELPHI (эксплуатация примерно 500 моточасов)



Контактная группа чувствительного элемента



Контактная группа чувствительного элемента



Контактная группа чувствительного элемента

После примерно 500 часов работы на моторном стенде отсутствуют следы повреждений и коррозии

Наблюдаемые повреждения ДК NoName после 50 часов эксплуатации



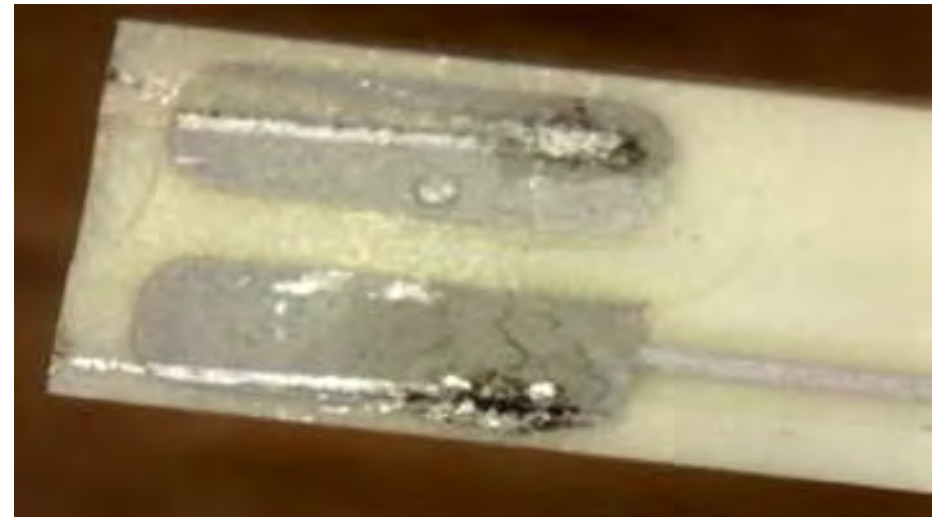
Повреждения дорожек, подходящих к электроду



Повреждения контактных площадок



Коррозия и износ контактной группы датчика кислорода



Растрескивание контактных площадок

Мы наблюдаем следующие повреждения:

1. Механическое повреждение и износ контактных площадок чувствительного элемента.
2. Растрескивание контактных площадок чувствительного элемента.
3. Выкрашивание или отслоение или расплавление частей токоведущих дорожек от измерительного электрода к контактным площадкам как в области, обращенной к отработавшим газам, так и обращенной к окружающей среде.
4. Контактные площадки нагревателей всех трех ДК не имеют заметных повреждений, нагреватели в рабочем состоянии.
5. Заметна деформация части планарного элемента, обращенная в сторону горячих отработавших газов.
6. Контакты и контактные площадки ДК BrandName и DELPHI не имеют подобных повреждений при сравнимом или большем сроке эксплуатации. От исследованных образцов NoName ДК BrandName и DELPHI отличаются длинным хвостовиком. Это означает, что температура в районе контактной группы у него ниже. По техническим условиям DELPHI температура контактной группы не должна превышать 450 °С, в то время как максимальная температура внизу, возле шестигранника оценивается в 700 °С. Это означает, что контактная группа исследуемых образцов NoName V2..4 работает в более тяжелых температурных условиях.
7. На фото контактов ДК Noname заметно повреждение покрытия.

Методика исследования и пробоподготовка

Пробоподготовка

- Отбор фрагментов (контактные площадки, дорожки, корпус, колпачок).
- Разрез через **электрод/электролит**:
- Послойная шлифовка

Методика

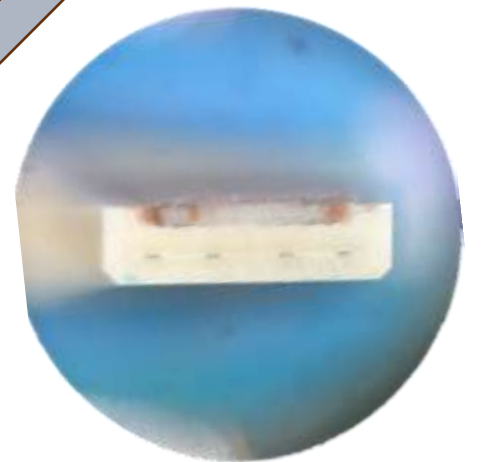
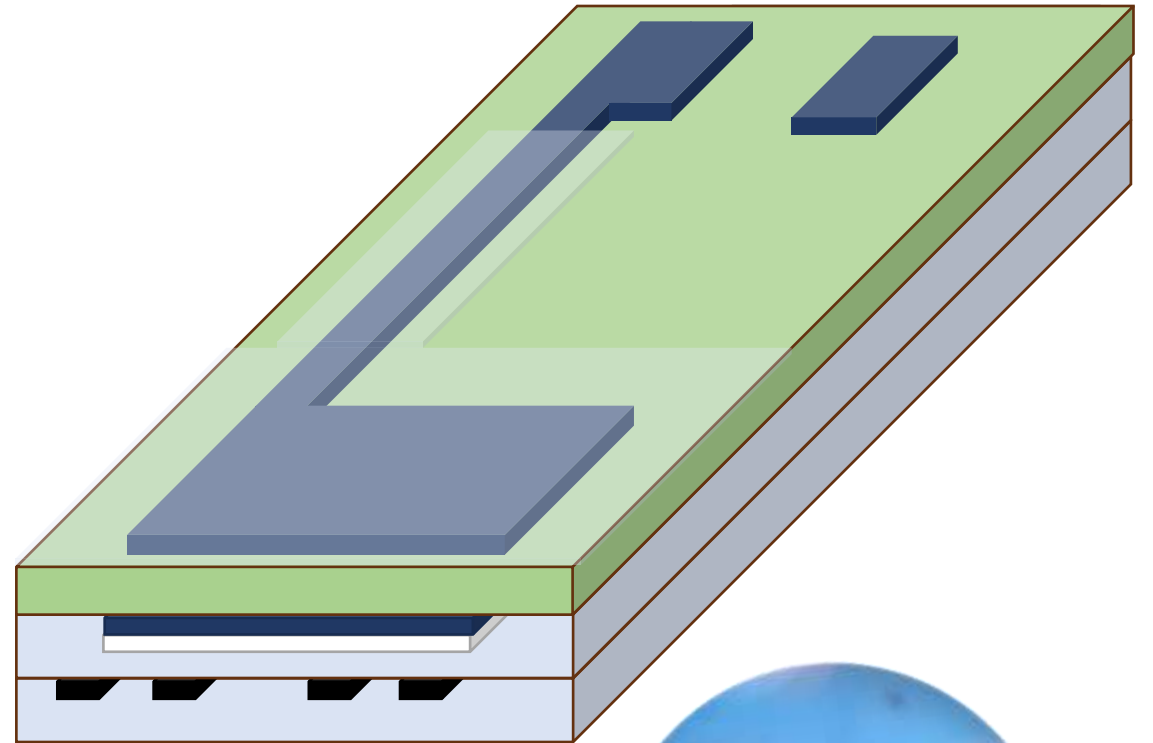
- SEM (сканирующая электронная микроскопия):**

режим SE (морфология поверхности), BSE (контраст по элементам).

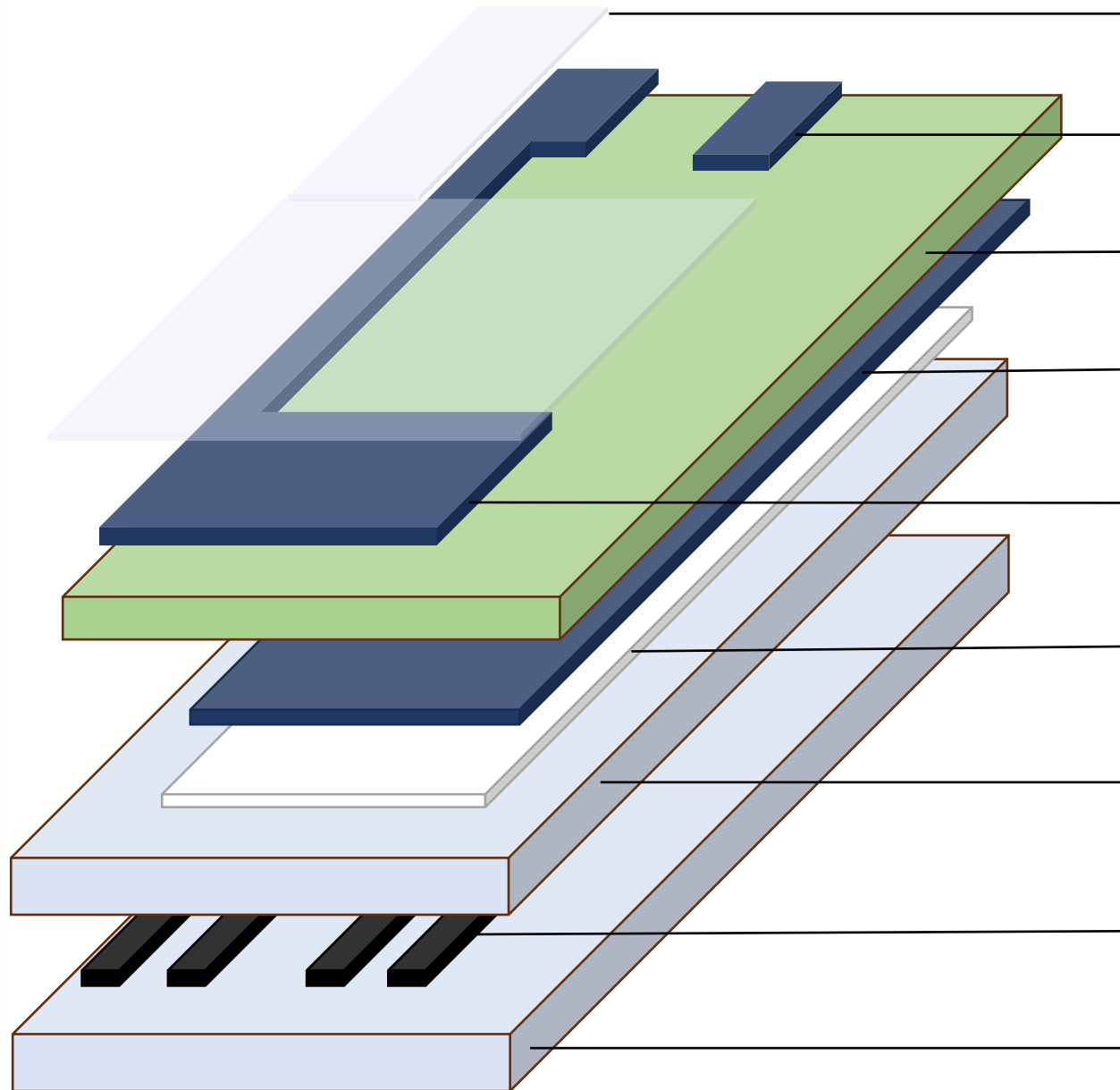
- EDS (энергодисперсионная спектроскопия):**

точечный анализ (Рабочее напряжение: 5–15 kV)

- Оптическая микроскопия



Планарный стек



Защитный/изоляционный слой наружного электрода (Al_2O_3 , стеклокерамика)

- Защита Pt от механического износа и агрессивных газов.
- Пропускает кислород, но снижает эрозию электрода.

Контактные площадки (Pt)

- Подключение электрических цепей (сигнал, масса, питание нагревателя).
- Требуют коррозионной стойкости и термостойкости.

Электролит (YSZ – стабилизированный диоксид циркония, $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$)

- Твёрдый электролит, проводит O^{2-} -ионы при $T > 350$ °C.
- Разделяет эталонную камеру и выхлопные газы.

Внутренний электрод (Pt, пористый)

- Контактует с эталонным воздухом.
- Формирует вторую половину электрохимической ячейки Нернста.

Наружный электрод (Pt, пористый)

- Контактует с выхлопными газами.
- Катализирует диссоциацию O_2 , обеспечивает электрохимическую реакцию.

Герметичная камера эталонного газа

- Содержит воздух с фиксированным $p\text{O}_2$ ($\approx 21\%$).
- Обеспечивает стабильное сравнение с выхлопом.

Изоляционный слой (Al_2O_3)

- Электрически изолирует нагреватель от чувствительного элемента.
- Обеспечивает механическую стабильность.

Нагреватель (тонкоплёночный Pt или Pt-сплав)

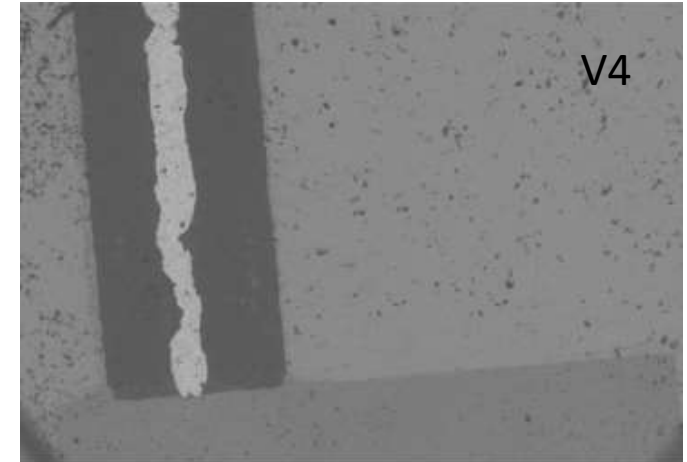
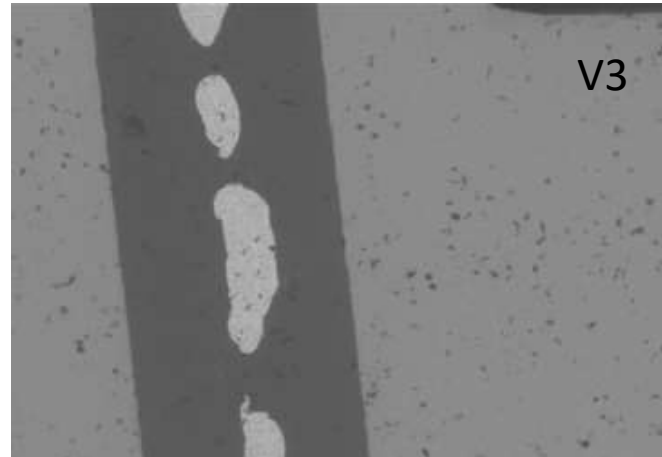
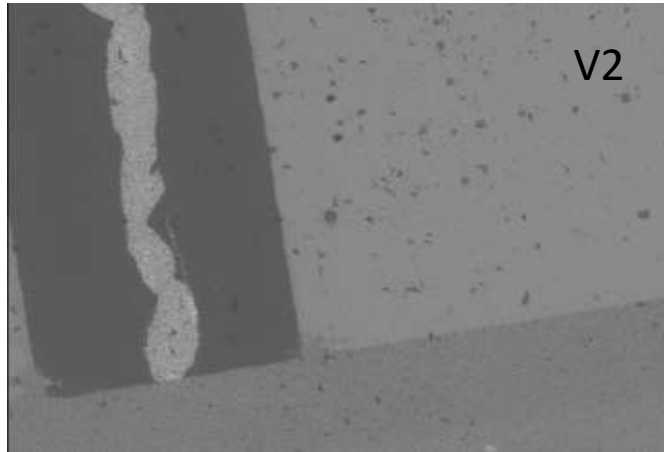
- Быстро разогревает сенсор до рабочей температуры.
- Снижает время активации (cold start).

Подложка (керамика Al_2O_3)

- Несущая конструкция для всех слоёв.
- Обеспечивает прочность и тепловую стабильность.

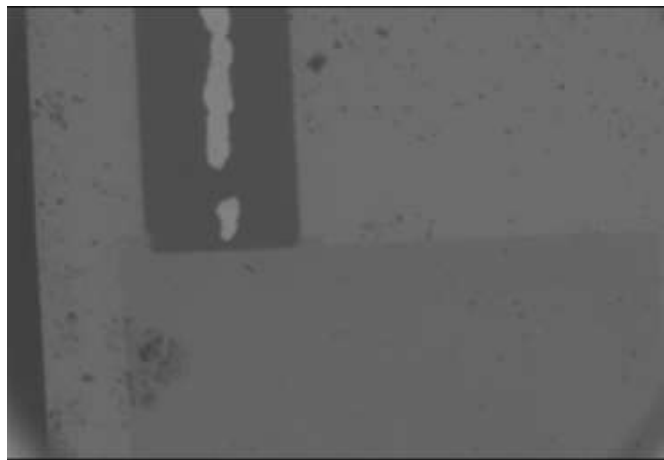
Контакт чувствительного элемента и контактная дорожка

NoName

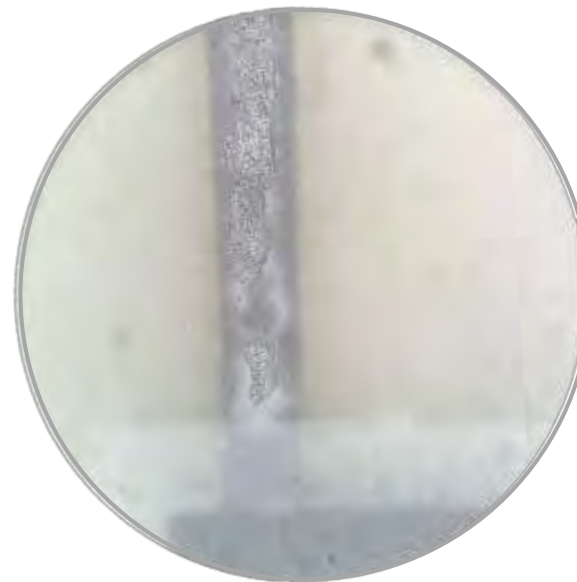


Локальные непокрытые участки контактной дорожки

NoName новый



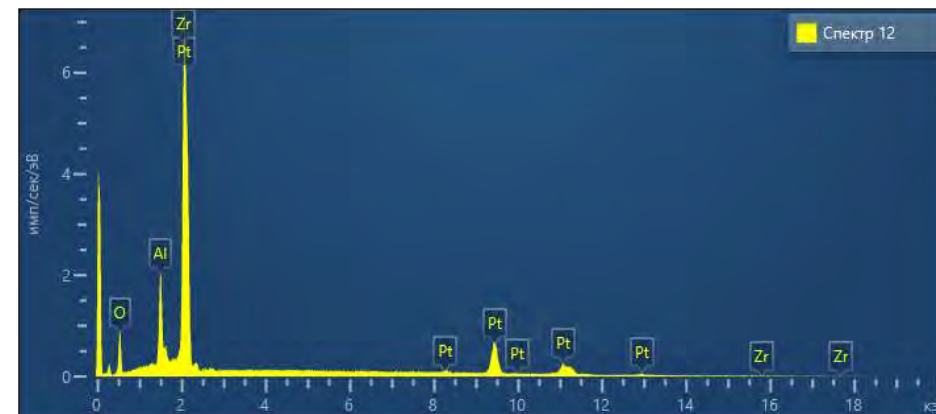
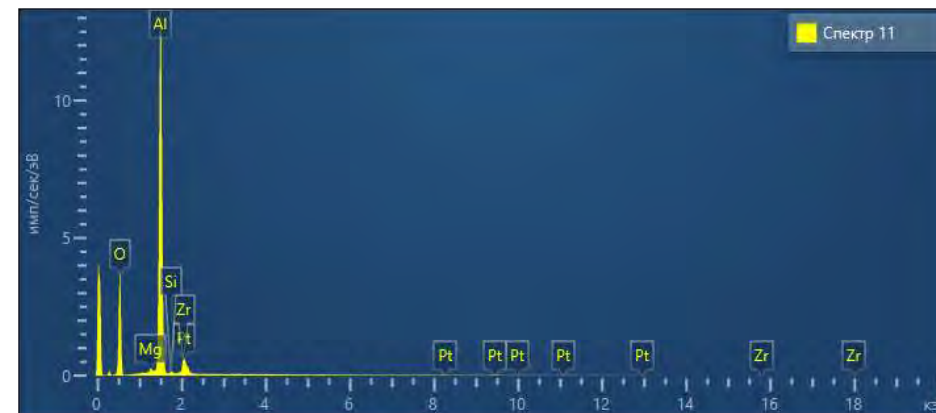
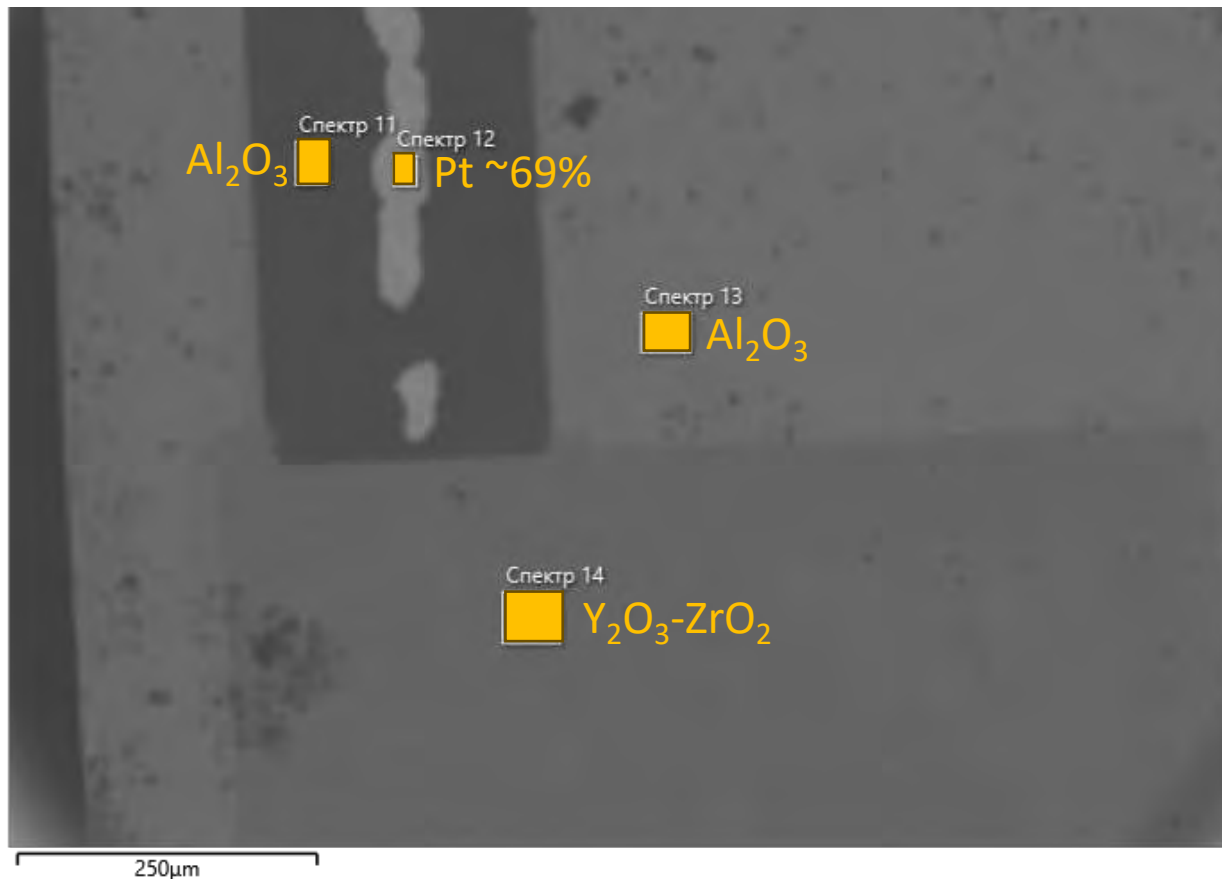
Такие же открытые зоны контактной дорожки видны и на новом образце



Открытые зоны Pt различимы и в оптическом микроскопе

Контакт чувствительного элемента и контактная дорожка

NoName

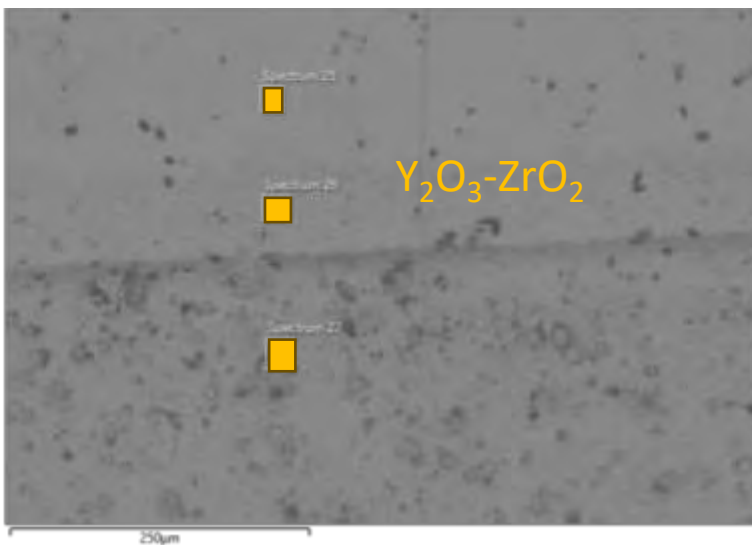


Возможные последствия:

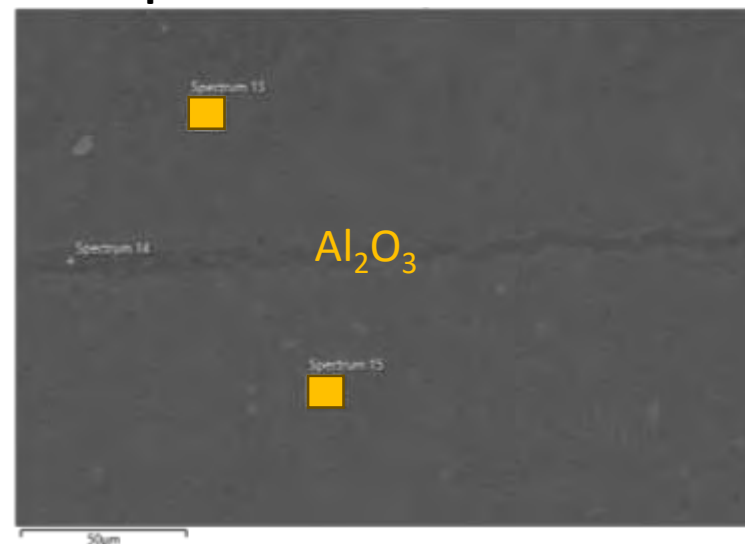
«Неравномерная (локально тонкая) верхняя изоляция Al_2O_3 над контактной дорожкой → локальный химико-термический износ Pt, нагар, диффузия YSZ в контактную область → потеря сплошности и отказ».

Контакт чувствительного элемента и контактная дорожка

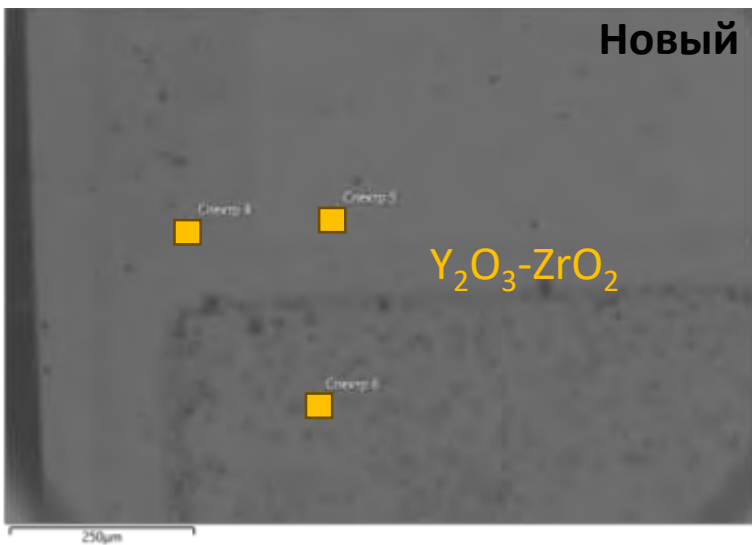
Brand Name



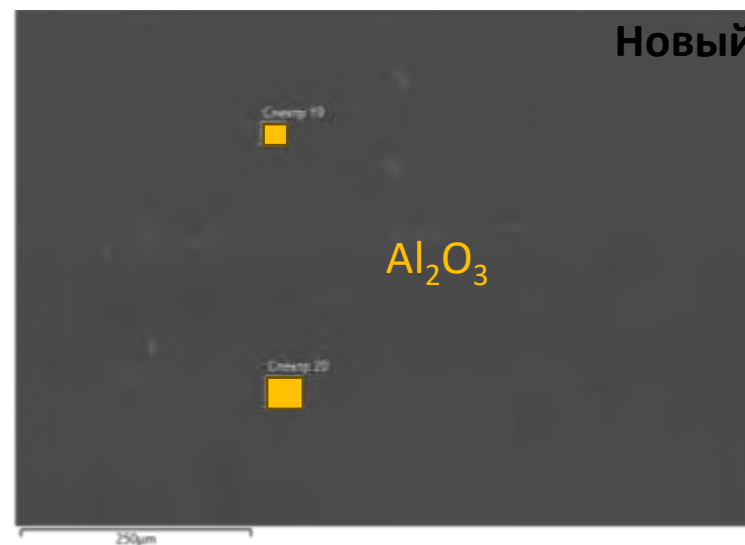
Delphi



Новый

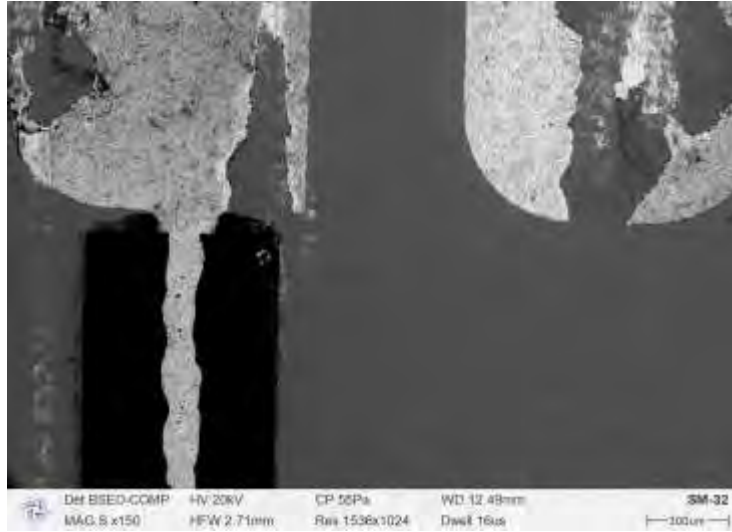


Новый

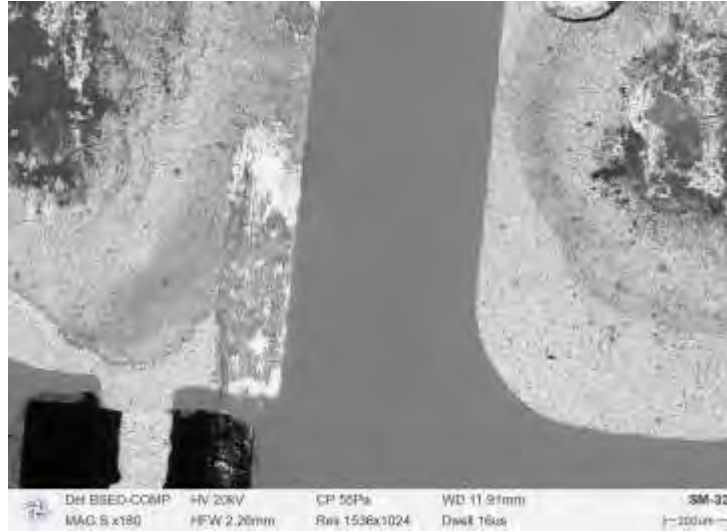


Контакты чувствительного элемента

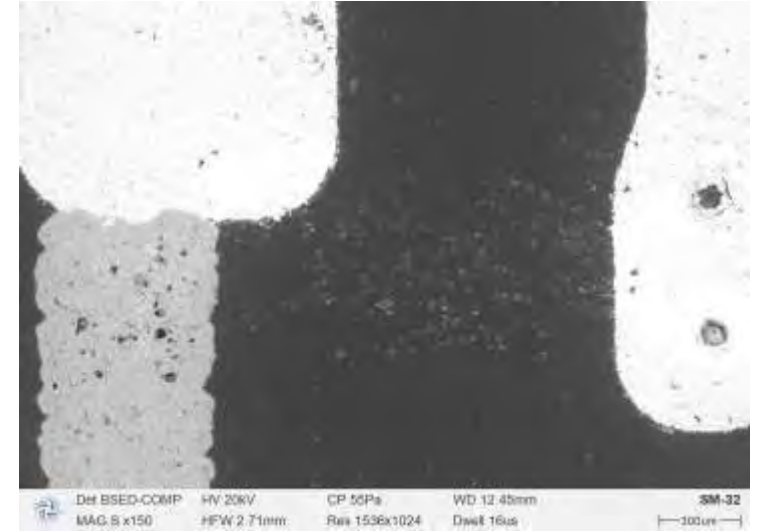
NoName V2



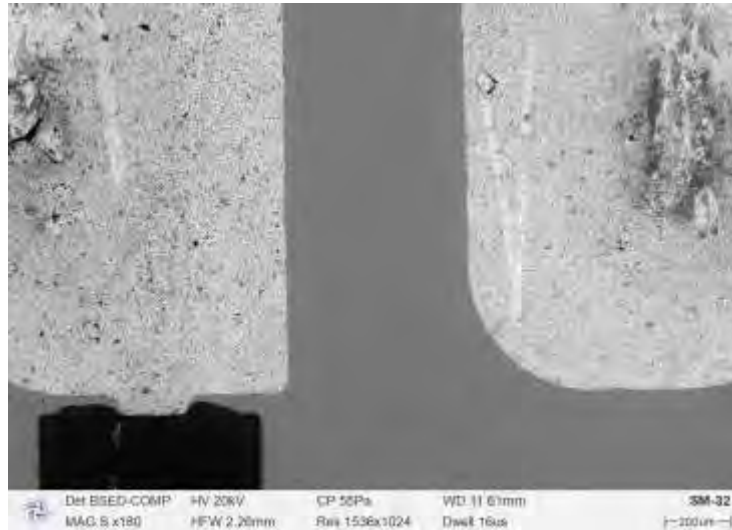
NoName V3



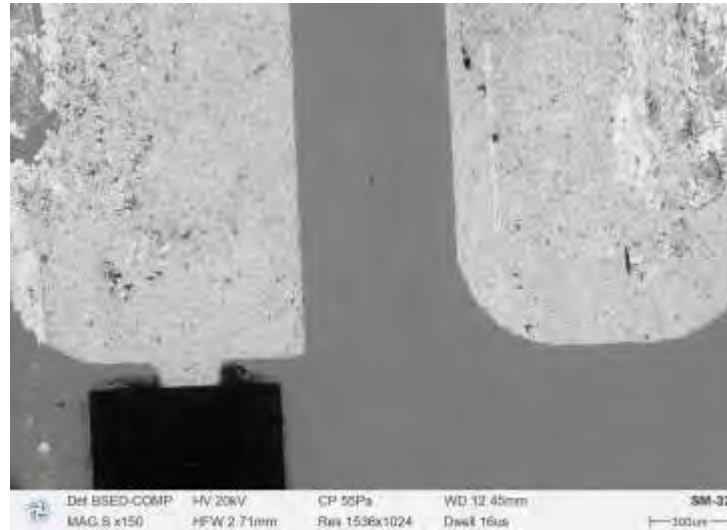
BrandName



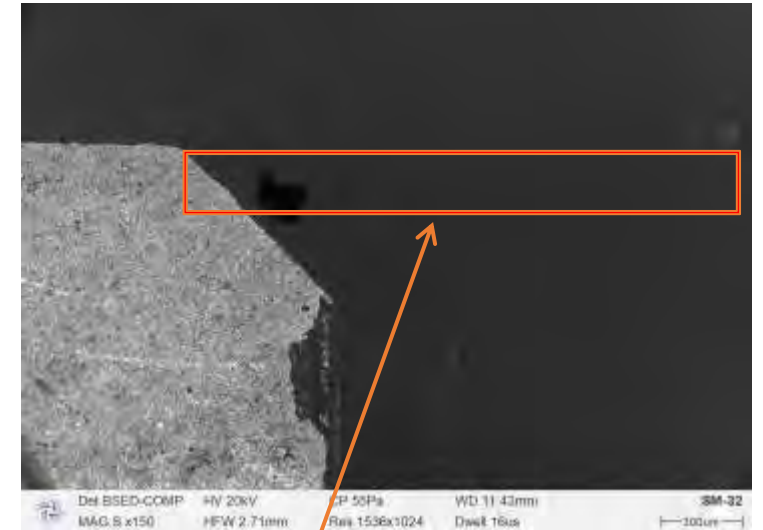
NoName V4



NoName New



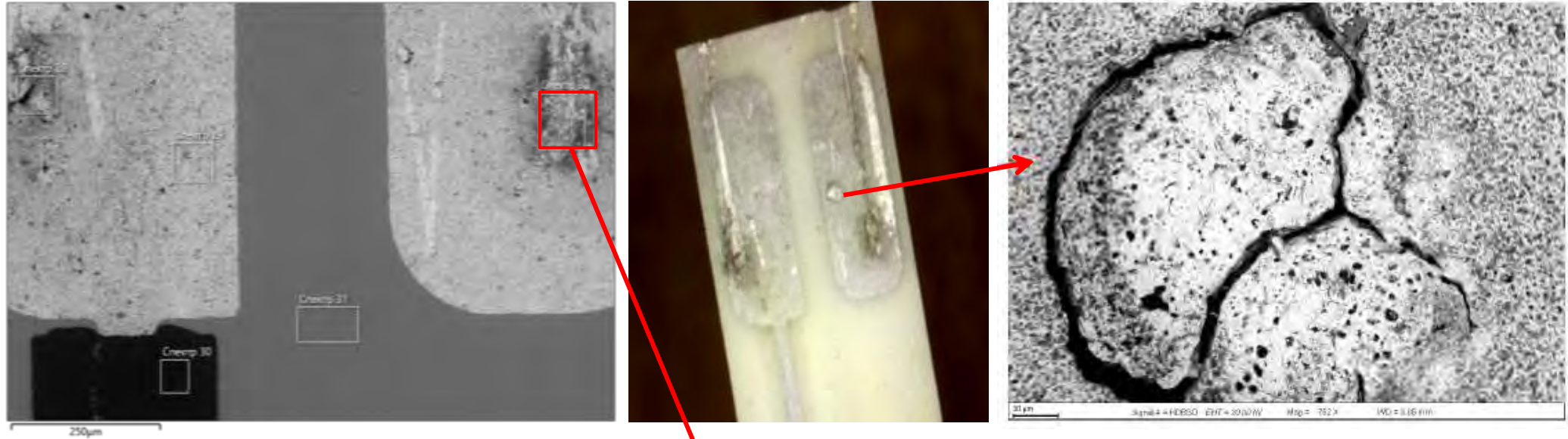
Delphi



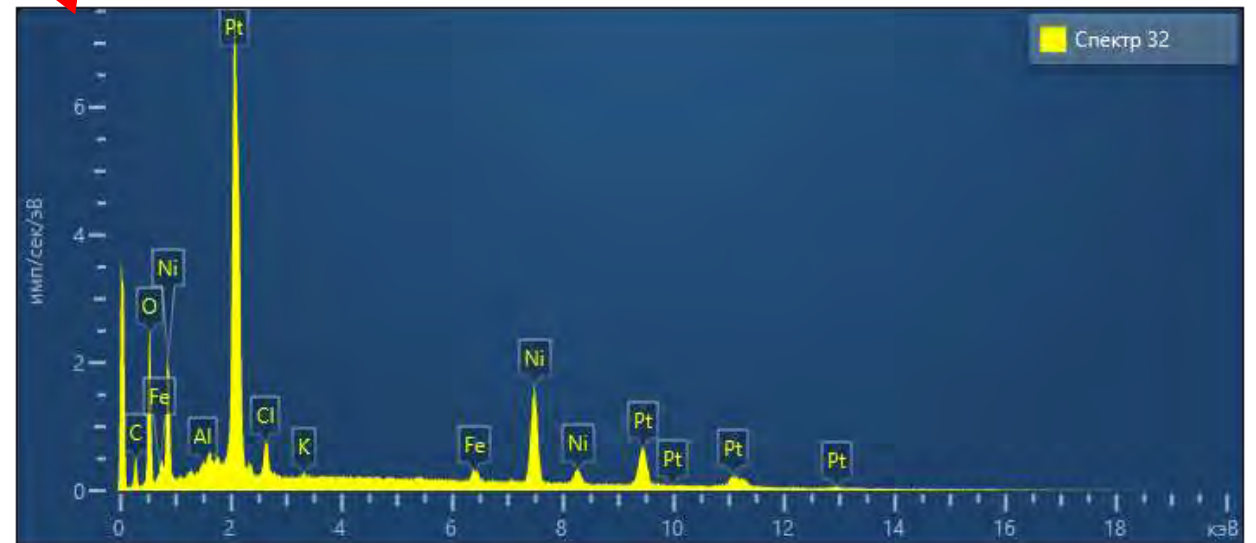
Контактная дорожка, хорошо изолирована

Контакты чувствительного элемента

NoName

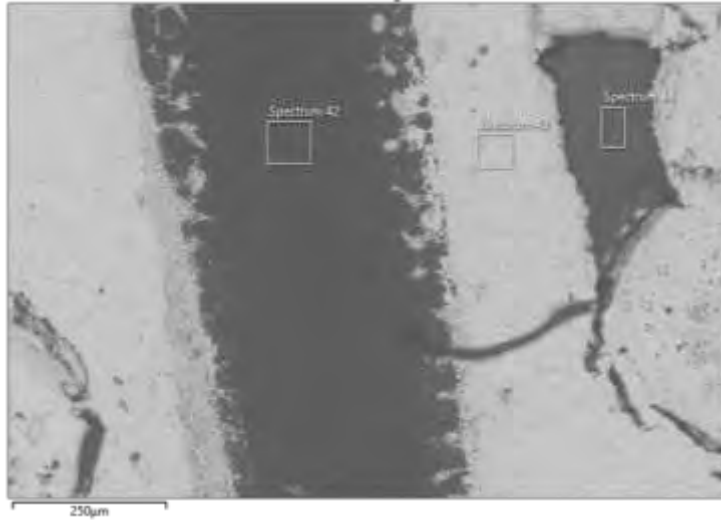


Спектр 32	
Элемент	Вес %
C	12.10
O	20.68
Al	0.50
Cl	1.69
K	0.24
Fe	1.53
Ni	18.18
Pt	45.08
Всего	100.00

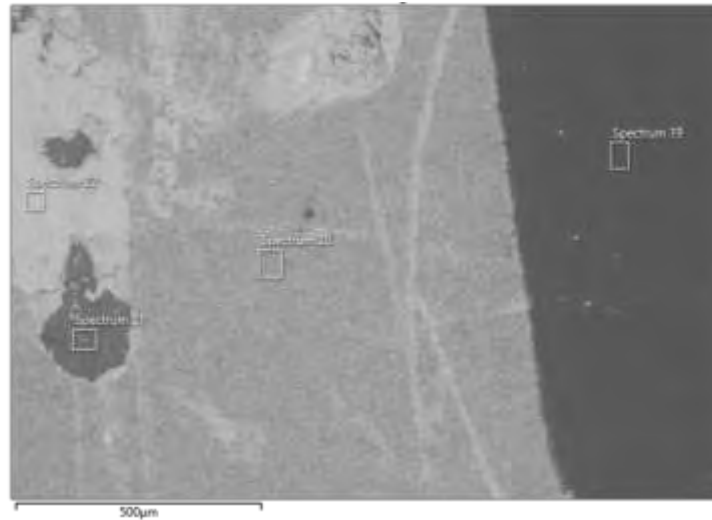


Контакты нагревателя

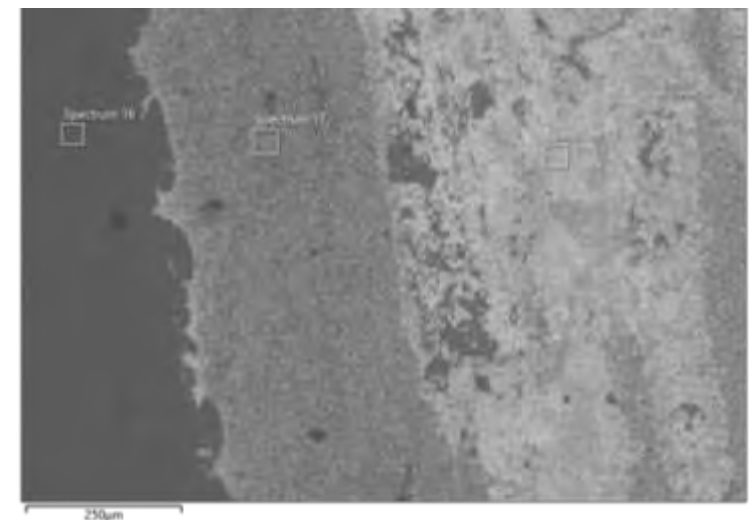
NoName



Brend Name



Delphi



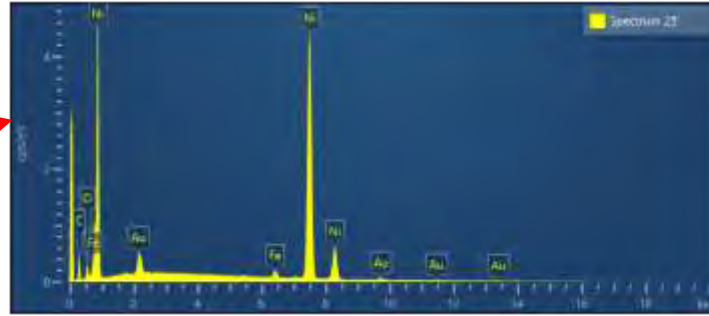
Фиксируются **небольшие потери сплошности слоя Pt** и **нарушения границы металлизации**, особенно в зонах сопряжения с изоляцией.

Несмотря на это, критических разрушений, которые могли бы привести к отказу нагревателя, не выявлено.

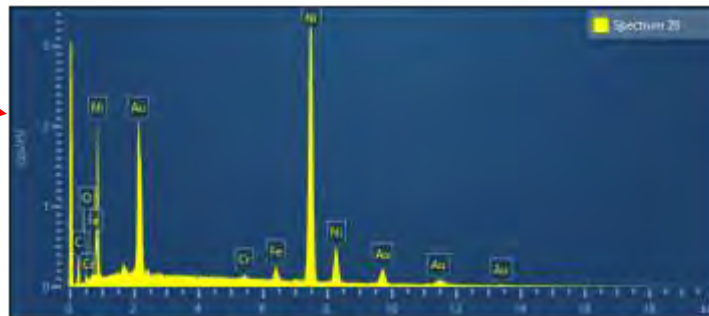
В целом, нагреватели оказались более стабильными по сравнению с контактами чувствительного элемента.

Контактная группа

NoName



Spectrum 25	
Element	Weight %
C	19.68
O	2.53
Fe	1.18
Ni	72.30
Au	4.32
Total	100.00

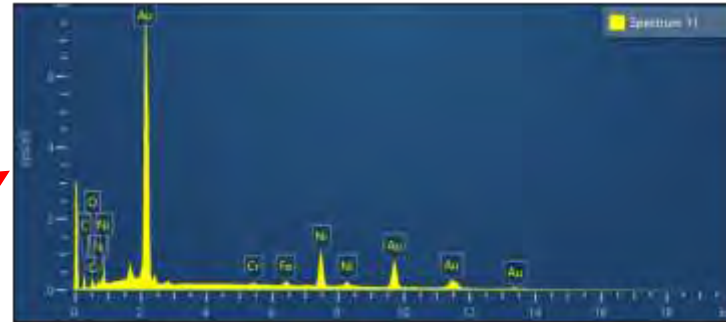
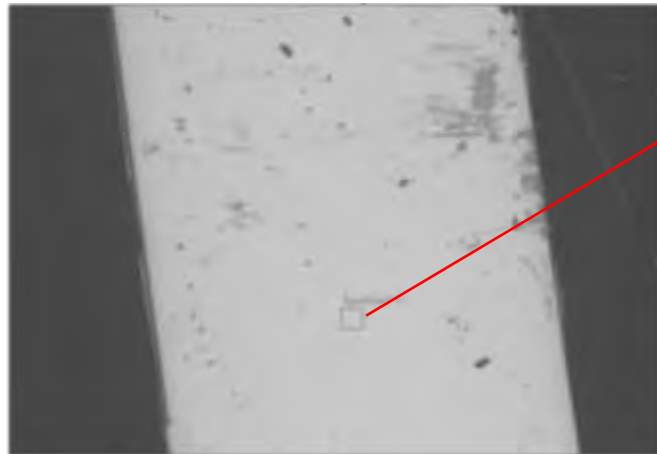


Spectrum 26	
Element	Weight %
C	15.42
O	2.20
Cr	0.36
Fe	1.70
Ni	58.53
Au	21.79
Total	100.00

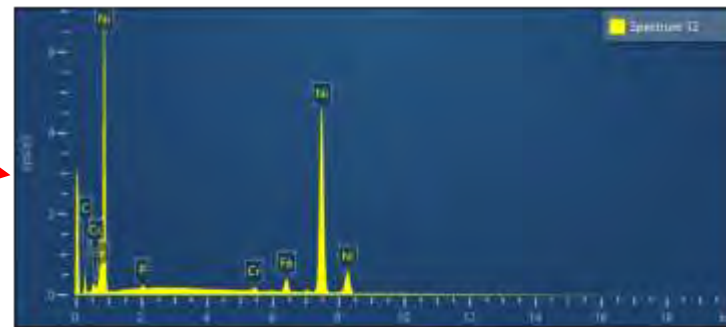
Контактная группа, соединяющаяся с платиновыми площадками, образцов V2, V3, и V4 представляет собой золочёный никелевый контакт. Покрытие - гальваническое золото, что типично для разъёмов, контактов, клемм, контактных площадок, где требуется высокая проводимость, коррозионная стойкость и инертность по отношению к благородным металлам (Pt).

Контактная группа

BrendName



Spectrum 11	
Element	Weight %
C	12.56
O	5.12
Cr	0.36
Fe	1.23
Ni	15.14
Au	65.59
Total	100.00

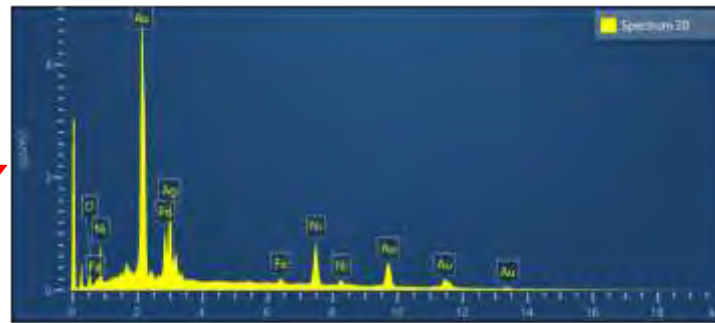


Spectrum 12	
Element	Weight %
C	20.81
P	0.25
Cr	0.71
Fe	3.04
Ni	75.19
Total	100.00

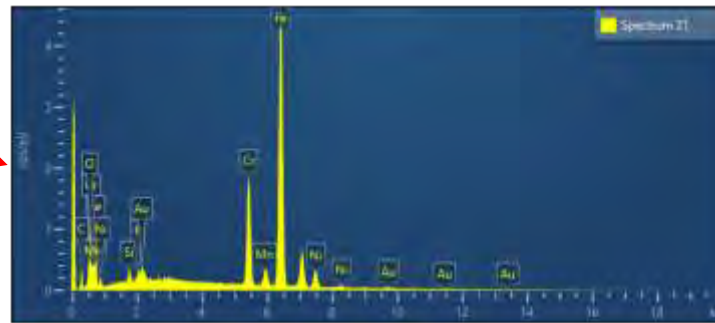
Контактная группа образца С1 также имеет двухзонную структуру: Внешний слой — золото с никелевым подслоем; внутренний контактный металл — высоконикелевый сплав с Fe, Cr и C (может нихромы и жаропрочные Ni-Fe-Cr сплавы). Более рыжий цвет контактов по сравнению с образцами V2, V3, и V4 объясняется высоким содержанием золота в покрывающем контактном слое

Контактная группа

Delphi



Spectrum 20	
Element	Weight %
O	9.51
Fe	0.97
Ni	13.27
Pd	11.91
Ag	14.46
Au	49.89
Total	100.00



Spectrum 21	
Element	Weight %
C	13.28
O	7.11
Si	0.80
P	0.46
Cr	13.87
Mn	0.78
Fe	56.28
Ni	5.46
Au	1.95
Total	100.00

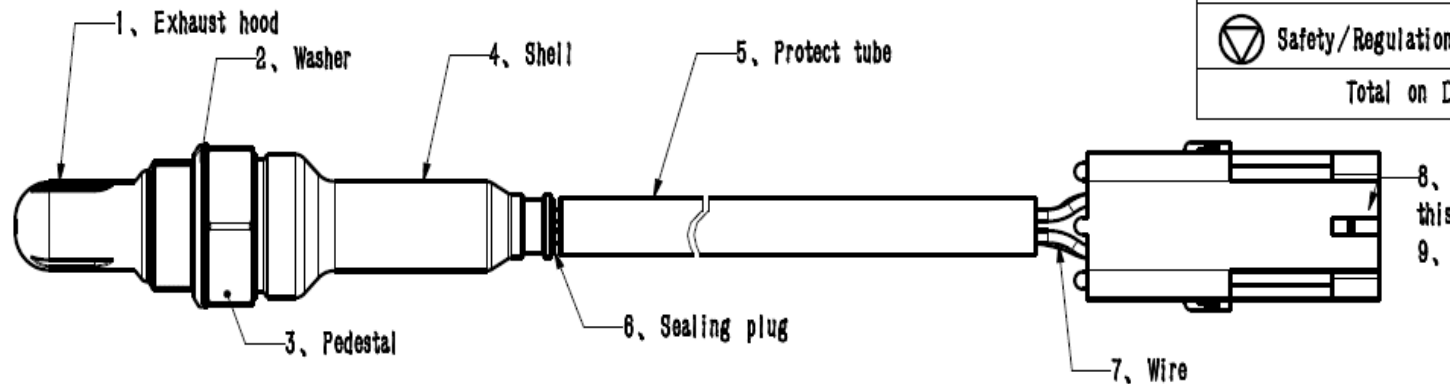


Контактная группа образца Delphi выполнена, вероятно, из **хромистой стали** с добавками Ni и Mn, что делает её жаростойкой, механически прочной, коррозионностойкой. Такой материал подходит для силовых и виброустойчивых контактов, особенно если верхний слой (в спектре 20) покрыт **Au-Pd-Ag**. Это соответствует практике: **механически прочная подложка + благородное покрытие**.

Контактная группа

Бренд / Образец	Материал основы	Покрытие	Особенности / проблемы
NoName (V2–V4)	Ni (чистый или Ni-сплав с низким Cr, Fe)	Гальваническое Au (тонкий слой)	<ul style="list-style-type: none"> - Простая конструкция без барьерных слоёв.- Высокий углерод на поверхности (нагар/загрязнения). - Уязвимость к коррозии и перегреву.
BrendName	Ni–Fe–Cr сплав (жаропрочный)	Золото, более толстый слой	<ul style="list-style-type: none"> - Контакт «рыжий» из-за высокого Au.- Выявлена диффузия Zr и Pt в зону нагревателя (разрушение межслоевого барьера).
Delphi	Хромистая сталь с добавками Ni, Mn	Благородное покрытие Au–Pd–Ag	<ul style="list-style-type: none"> - Механически прочная подложка + благородный верхний слой.- Высокая жаростойкость и виброустойчивость.- Минимальные признаки деградации даже после длительной работы.

Исследование состава материалов корпуса ДК



Key	
	Safety/Regulation
	Total on I

Pos.	Component	Materisal Code	Materisal Code	Materisal Code	Composition
		Brand 3	Brand 2	Brand 3	
1	Exhaust hood	SUS310S	SUS310S	MAT'L SAE 30310S STAINLESS STEEL ALT WITH JIS G 4305 SUS 310S	Nickel (Ni): 19-22%, Chromium (Cr): 24-26%, Manganese (Mn): <2%
4	Shell	SUS316		MAT'L SAE 30304 STAINLESS STEEL ALT WITH JIS G 4305 SUS304	Nickel (Ni): 10-14%, Chromium (Cr): 16-18%, Manganese (Mn): <2%, Molibdenum (Mo): 2-3%

Data Description	Sensor Name	Position	Name of Position	Alloy Name	Ni	Cr	Mn	Si	P	S	O	C	Fe	Mo	Na	Al
					% weight	% weight	% weight	% weight	% weight	% weight	% weight	% weight	% weight	% weight	% weight	% weight
Alloy Specification		1	Exhaust hood	SUS310S	19-22	24-26	<2	<1,5	<0,045	<0,03						
Mesured	V2	1	Exhaust hood		7,65	13,11	1	1,87			9,85	11,81	51,58	1,86	0,43	0,85
Mesured	V4	1	Exhaust hood		8,61	15,02	1,09	1,16			5,43	6,98	59,39	1,93		0,4
Mesured	C1	1	Exhaust hood		7,75	14,32	1,27	0,6			5,03	11,58	57,62	1,82		
Mesured	DELPHI	1	Exhaust hood		12,96	19,52	1,06	0,57			10,37	15,96	39,56			

Выводы

NoName датчики:

- Имеют укороченный хвостовик и более высокую температуру в зоне контактов.
- На планарном стекле выявлены неполные покрытия дорожек изоляцией Al_2O_3 → открытые участки Pt.
- Контактные площадки деградируют: Pt-слой теряет сплошность, появляются загрязнения (углерод), диффузия Zr/Y из электролита.
- Контактная группа корпуса упрощена: Ni + тонкий Au, низкая стойкость.
- Корпус/колпачок сделан из менее легированной стали, чем стандарт SUS310S.
- **Возможная причина отказов — совокупность конструктивных и материаловедческих упрощений.**

BrandName (C1):

- Улучшенные материалы (Ni–Fe–Cr, более толстый слой Au).
- Тем не менее, зафиксирована диффузия Pt/Zr в область контакта → барьерные слои работают неидеально.

Delphi:

- Контакты спроектированы правильно: прочная хромистая сталь + благородное многослойное покрытие Au–Pd–Ag.
- Изоляция сплошная, Pt-слой не открыт.
- После 500 моточасов эксплуатации дефекты не обнаружены.
- **Наиболее оптимальная конструкция и материалы.**

**СПАСИБО
ЗА ВНИМАНИЕ!**

·: **ИТЭЛМА**[®]
Электронные
решения



ИОФ РАН