

## **ГЕРМЕТИЧНЫЙ ТЕРМОДАТЧИК ИНДИКАЦИИ ПУЛЬСАЦИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ**

*Представлены результаты синтеза герметичного термодатчика для диагностики пульсаций температуры огневой поверхности в камерах сгорания двигателей. Анализируются термические напряжения в конструкции термодатчика при воздействии быстропеременных температур в камерах сгорания двигателя. Материал может быть полезен при решении проблем техносферной безопасности.*

*Ключевые слова: герметичный термодатчик, термические напряжения.*

*A.V. Klygin, Yu.A. Polyakov*

## **SEALED SENSOR FOR DISPLAY PULSATIONS TEMPERATURE IN THE COMBUSTION CHAMBERS OF ENGINES**

*The results of synthesis of the sealed temperature sensor for diagnostics pulsations temperature hot face of the combustion chambers of engines are presented. The analysis of thermal stresses in the sensor structure by the action of rapidly varying temperatures in the combustion chambers of engines was carried out. The material can be helpful in solving the problems of technosphere safety.*

*Key words: sealed sensor, thermal stress.*

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 14 марта 2017 г.

Повышение удельных характеристик мощности двигателей внутреннего сгорания связано с повышением теплонапряжённости основных деталей, образующих камеру сгорания двигателя любого назначения. Периодические колебания температуры огневой поверхности камеры сгорания инициируют быстропеременные термические напряжения, которые приводят к разрушениям усталостного типа и ускоряют процесс коррозии внутренней поверхности камеры сгорания.

Высокочастотные колебания температуры поверхности стенки вызывают пульсации теплового потока, которые накладываются на стационарное тепловое поле [1]. Развитие корректных методов диагностики быстропротекающей стационарно-периодической теплопередачи между рабочим телом и стенками камеры сгорания диктуется также общим требованием оптимизации системы охлаждения двигателей, повышения их эффективности и ресурсной надёжности.

Для индикации тепловых возмущений в камерах сгорания, а также любого рода объёмах с высоким уровнем давления и температуры, была разработана технологическая цепочка синтеза герметичного сигнального термодатчика на массивной матрице с тонкоплёночным *чувствительным элементом (ЧЭ)*, функционирующим в режиме терморезистора.

Создание неразборной конструкции с целью предотвращения прорыва газов между подложкой и корпусом датчика предопределило проведение комплекса работ по подбору материалов электродов, корпуса и подложки с целью получения надёжных и прочных соединений при действии импульсных или высокочастотных температурных воздействий.

В качестве материала корпуса был выбран ковар марки Н29К18-А и в качестве подложки – тугоплавкое стекло № 40. Следует заметить, что различие *коэффициентов термического расширения (КТР)* указанных материалов невелико, что благоприятно с точки зрения возникновения термических напряжений в подложке.

Синтез герметичных термодатчиков проводился в следующей последовательности:

1 этап – изготовление корпуса датчика из ковара и отжиг его в водородной печи в течение суток;

2 этап – операция заливки жидкого стекла № 40 в корпус при наличии двухканальной керамической соломки. Остывание происходит в свободной атмосфере;

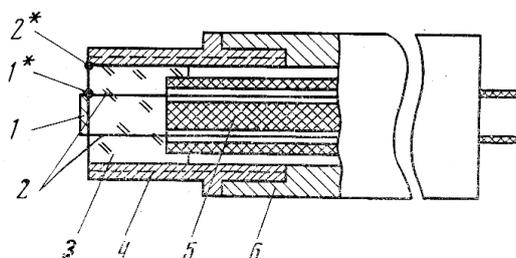
3 этап – шлифовка и полировка приёмного торца;

4 этап – нанесение чувствительной плёнки из платинирующей пасты и термообработка. Температура отжига составляла ~ 750-780 °С;

5 этап – нанесение защитной изолирующей плёнки из диоксида кремния, если это требуется по условиям эксплуатации;

6 этап – соединение платиновых электродов с медными измерительными проводами контактной сваркой;

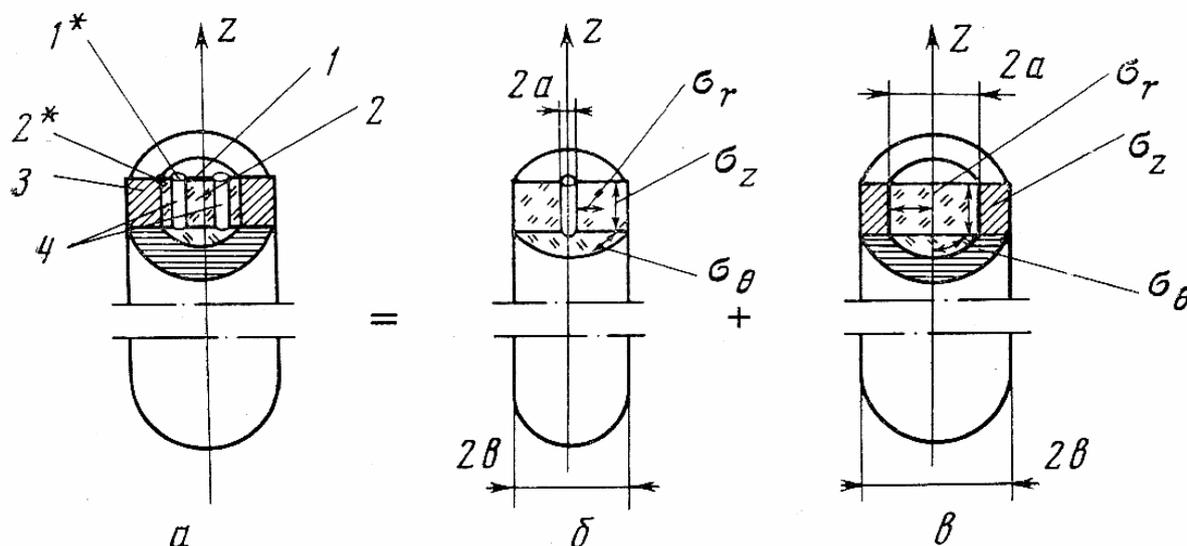
7 этап – соединение корпуса сенсора с защитным штуцером с резьбой и фиксация выводов путём заливки торцевого объёма эпоксидным компаундом. В результате была синтезирована конструкция термодатчика, представляющая собой *неразборное* соединение всех составных элементов в едином преобразователе информации (рис. 1).



**Рис. 1.** Конструкция герметичного термодатчика:

- 1 – чувствительная плёнка; 2 – платиновые электроды; 3 – подложка;  
4 – корпус датчика; 5 – керамическая соломка; 6 – штуцер

Для оценки уровня термических напряжений в конструкции, возникающих в датчике после отжига и при работе в объектах с повышенной температурой, предложена физическая модель для расчёта радиальных, тангенциальных и осевых составляющих напряжений ( $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$ ,  $\sigma_z$ ) (рис. 2).



**Рис. 2.** Модель для анализа термических напряжений:  
 а) – термодатчик; б) – бусинковый спай; в) – глазковый спай;  
 1 – плёнка; 2 – стекло; 3 – металл; 4 – электроды

Суммарные напряжения в наиболее опасных точках  $1^*$  и  $2^*$  определяются методом наложения напряжений, полученных по соотношениям для спаев "бусинкового" и "глазкового" типов, которые были взяты из работы [2].

Эти соотношения использованы для расчёта составляющих термических напряжений, возникающих после отжига ( $t = 580^\circ\text{C}$ ) при охлаждении сенсора до  $t = 20^\circ\text{C}$  и составляющих напряжений, возникающих при повышении температуры подложки от  $20^\circ\text{C}$  до  $450^\circ\text{C}$ . При расчётах коэффициент Пуассона для всех материалов сенсора принят равным 0,3, а механические свойства материалов – независимыми от температуры.

Установлено, что наибольшую опасность для сенсора представляет напряжение растяжения  $\sigma_r = 13,3 \text{ кг/мм}^2$ , возникающие при отжиге в точке  $1^*$ . Однако, как показали исследования более несогласованного спае, допустимые напряжения  $\sigma_r$  в бусинковом спае могут достигать  $16 \text{ кг/мм}^2$ . Из опыта изготовления сенсоров неразъёмной конструкции следует отметить, что при указанных температурных перепадах растрескивания спае в точке  $1^*$  не происходило. Сжимающие напряжения составили величину  $\sigma_\theta = 19,0 \text{ кг/мм}^2$ . Хотя величина и значительна, но опасности эти напряжения не представляют, так как допустимые напряжения сжатия значительно выше. Другие составляющие напряжений даже в предельном случае, когда диаметр центрального электрода равен сумме диаметров обоих электродов плюс расстояние между ними, не влияют катастрофически на общую картину напряжённого состояния.

Приведённая методика позволяет приближённо оценить влияние диаметров электродов на уровень напряжений в сенсоре. Расчёты проводились для электродов с диаметрами 0,15, 0,3 и 0,5 мм.

На рис. 3 приведены результаты расчёта температурных напряжений в точках 1\* и 2\* при температуре сенсора  $t = 450^\circ\text{C}$ .

Как видно из рис. 3, указанный диапазон диаметров электродов существенных изменений на уровень термических напряжений не вносит.

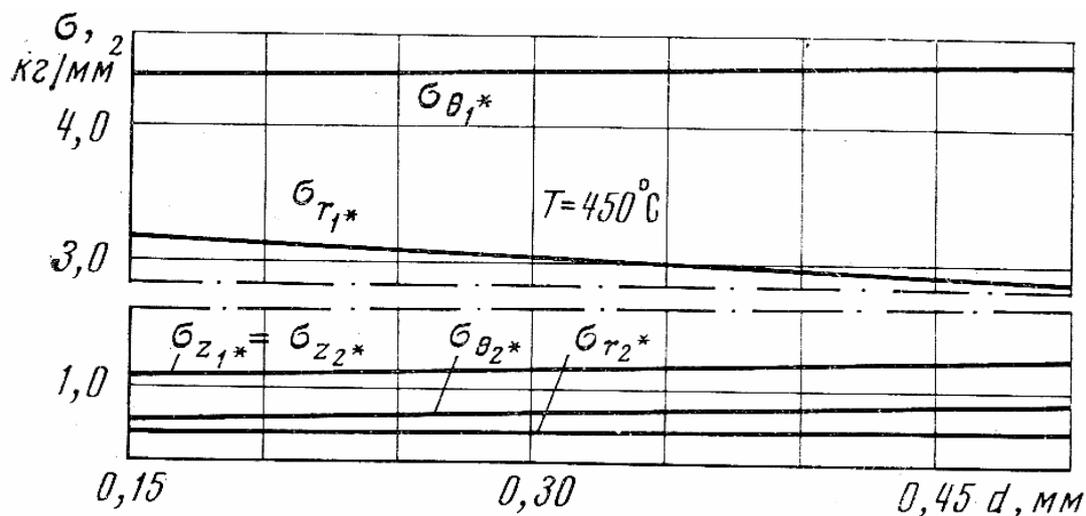


Рис. 3. Характер изменений напряжений в зависимости от диаметра электродов

Проанализируем характер термических напряжений в случае применения датчика в устройствах с однократным импульсным нагревом и кратковременного нагрева, периодически накладывающегося на средний уровень температурного фона. Резкий скачок температуры может привести к разрушению поверхности мерного тела.

Вследствие низкой теплопроводности стекла кратковременный термический удар распространяется лишь на поверхностные слои, в которых возникают большие сжимающие напряжения, оказывающие двоякое действие на спай. С одной стороны, они увеличивают значение  $\sigma_{\theta}$ , что не очень опасно, так как допустимые напряжения сжатия велики, а с другой – уменьшают напряжения растяжения  $\sigma_r$ , что благоприятно сказывается на работе спаев, поскольку наиболее опасны для стекла именно эти напряжения.

Максимальная величина этих напряжений может быть приближённо определена по формуле

$$\sigma = E\beta\Delta t(1-\mu), \quad (1)$$

где  $E$  – модуль Юнга;

$\beta$  – коэффициент термического расширения;

$\mu$  – коэффициент Пуассона.

Однако колебания температуры при нестационарных процессах на поверхности стекла и металла различны, так как зависят от теплофизических свойств этих материалов.

С помощью формулы

$$\Delta t_m = \Delta t_i \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_m},$$

где  $\varepsilon_i$  – тепловая активность стекла;

$\varepsilon_m$  – тепловая активность металла,

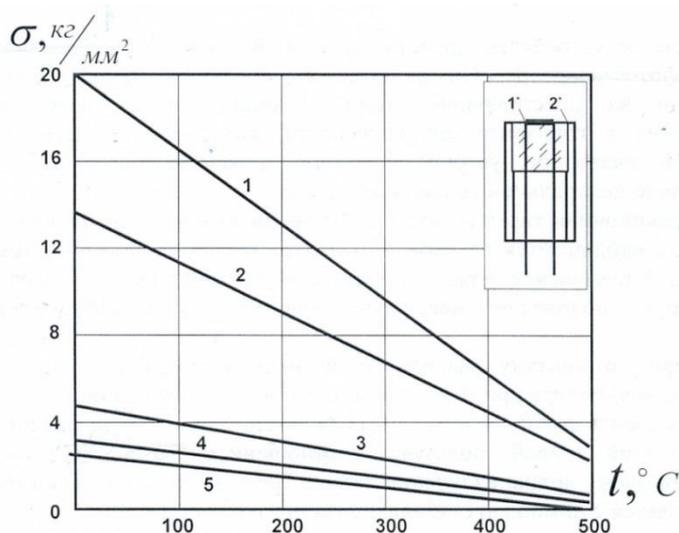
определяем значение импульсной температуры для металла (ковар, платина). По величине колебаний температуры вычисляем сжимающие напряжения на поверхности стекла и металла по формуле (1).

Как показали оценочные расчёты, различие соответствующих напряжений при колебаниях температуры на поверхности стекла и металла не превышает 30 % и можно считать определяющими напряжения в стекле, поскольку от его целостности зависит работоспособность термодатчика.

В реальных условиях процесса термические напряжения для стекла составляют  $\sigma \cong 6 \text{ кг/мм}^2$ .

Оценка термических напряжений по формуле (1) использована для термодатчиков, применяемых в ударноволновых или других фронтальных процессах при индикации однократных тепловых импульсов. Например, в условиях отражённой ударной волны, когда температура плёнки может достигать  $\sim 500^\circ\text{C}$ , термические напряжения для стекла достигают  $\sigma \cong 18 \text{ кг/мм}^2$ , что ещё ниже предела разрушения.

Суммарные результаты расчётов термических напряжений в характерных точках герметичной конструкции в зависимости от температуры представлены на графике рис. 4.



**Рис. 4.** Термические напряжения в характерных точках (1\* и 2\*) термодатчика от средней температуры подложки:

$$1 - \sigma_{\theta}^{1*}; 2 - \sigma_r^{1*}; 3 - \sigma_z^{1*} = \sigma_z^{2*}; 4 - \sigma_{\theta}^{2*}; 5 - \sigma_r^{2*}$$

(причём  $\sigma_r^{1*}$  – напряжение растяжения; остальные – напряжения сжатия)

Для тонкоплёночных диэлектрических защитных плёнок, наносимых путём испарения в вакууме применяются материалы, которые испаряются в вакууме без разложения, образуя на ЧЭ механически прочные плёнки, устойчивые к продуктам горения и другим веществам, способным исказить информационный сигнал.

В качестве защитных плёнок были успешно применены моноокиси и двуокиси кремния, а также плёнки из фтористого магния  $Mg F_2$ . Прочность плёнок из фтористого магния существенно увеличивается, если поверхность подложки экранируется от испарителя на время, пока температура испарителя достигнет рабочего значения; при этом наиболее прочные плёнки получаются при расположении экрана вблизи подложки.

В ряде случаев с целью снижения пористости покрытие выполнялось в виде двух плёнок. Сначала на платиновую плёнку наносился напылением охранный слой из фтористого магния толщиной  $\sim 60$  нм, затем на нём формировался защитный слой из двуокиси кремния толщиной  $\sim 40-50$  нм.

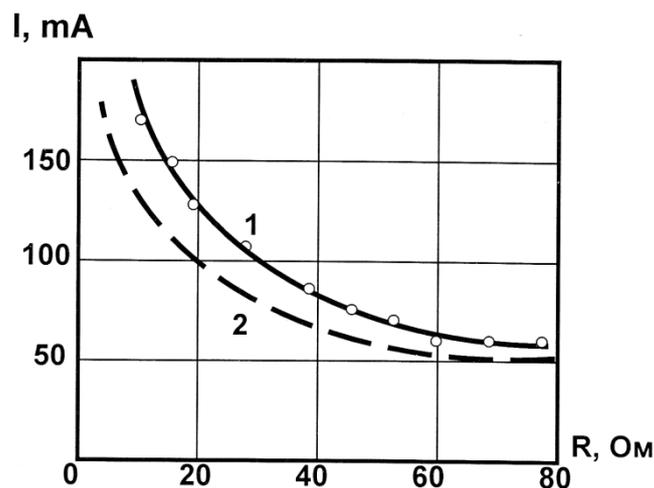
Двойное покрытие подвергалось термообработке в течение нескольких часов. Плёнки из окислов кремния обладают хорошими адгезионными свойствами, достаточной механической прочностью и хорошо предохраняют ЧЭ от различных химически активных веществ.

В аппаратуре, предназначенной для нанесения тонкоплёночных металлических чувствительных плёнок типа платины, родия или золота с защитными тонкими диэлектрическими покрытиями, необходимо предусмотреть наличие двух испарителей для нанесения основного и защитного слоя непосредственно друг за другом в вакууме без извлечения защищаемой плёнки на воздух. Даже следовые загрязнения в системе и испарение при повышенном газоотделении могут привести к повышению пористости плёнки и уменьшению её прочности.

Особенно эффективны в качестве тонких изоляций кварцевые плёнки. Установлено, что антикоррозийные свойства и сопротивление стиранию и появлению царапин у плёнок из кварца весьма велики. По сравнению с незащищёнными плёнками, сопротивление стиранию для некоторых металлов возрастает почти в 100 раз.

Особое внимание было уделено оптимизации токового режима терморезистора, так как он является термометром сопротивления. При изготовлении ЧЭ имеется разброс сопротивлений датчиков, поэтому для конкретного сенсора ток питания не должен превышать определённой величины, иначе будет нежелательный перегрев плёнки, что приведёт к её разрушению.

Были выбраны плёночные терморезисторы с сопротивлениями от 10 до 80 Ом и подвергнуты тепловому действию тока. Ток увеличивали до "сгорания" плёнки за счёт джоулева тепла. На рис. 5. приведены результаты опытов по разрушению ЧЭ.



**Рис. 5.** Зависимость предельного тока питания от омического сопротивления плёнки сенсора:  
1 – кривая, отражающая разрушение плёнки; 2 – оптимальная кривая, рекомендованных значений тока питания для конкретного  $R$

Эмпирическая формула для выбора тока питания может быть представлена в следующем виде:

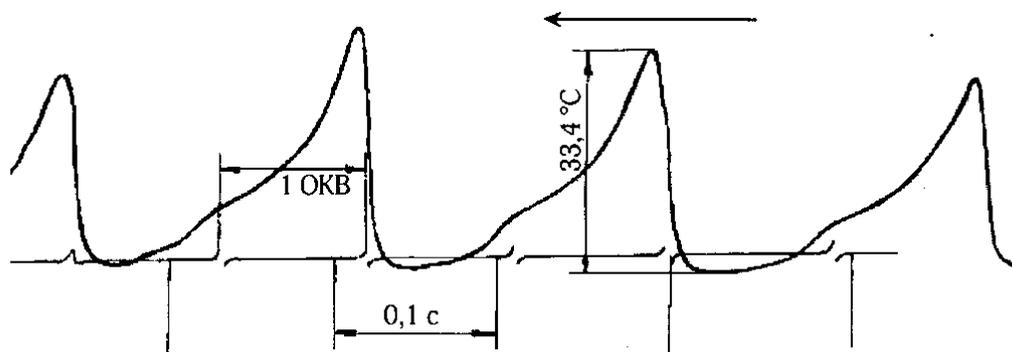
$$I^2 R = 0,2 Bm .$$

Рекомендуемый ток питания выбирается по кривой 2 или по формуле

$$I_{\text{рек.}} = \frac{450}{\sqrt{R}}, mA.$$

При таких параметрах эффект нагрева плёнки джоулевым теплом будет незначительным.

Испытание конструкции герметичного термодатчика проведено на вихрекамерном дизеле 1Ч 8,5/11 и двигателе ЯМЗ (стенды МГТУ им. Баумана и МАДИ). В опытах измерялись пульсации температуры на огневой поверхности крышки цилиндра. На рис. 6. приведена одна из осциллограмм колебаний температуры поверхности мерного тела (подложки) [3].



**Рис. 6.** Осциллограмма пульсаций температуры терморезистора, смонтированного на поверхности головки цилиндра двигателя ЯМЗ ( $n = 1\,300$  об./мин.;  $N_e = 10$  л.с.)

1 ОКВ – один оборот коленчатого вала.

Стрелка показывает направление движения фотоплёнки

Термограмма характеризует процесс теплопередачи от газа к стенке камеры сгорания двигателя. При этом в течение четырёх часов непрерывной работы термодатчика на поверхности в точках 1\* и 2\* никаких повреждений материала подложки не наблюдалось.

Терморезисторы в герметичном корпусе явились эффективными индикаторами высокочастотных температурных пульсаций на границе газ-стенка. Применение их при диагностике нестационарного теплообмена в двигателях внутреннего сгорания различного типа позволило выработать рекомендации по повышению моторесурса объектов транспортного назначения [4, 5].

### Литература

1. Орлин А. С., Поляков Ю. А., Сазонов Ю. И. Экспериментальное исследование теплообмена между газом и цилиндром вихрекамерного дизеля плёночными термометрами сопротивления // Энергомашиностроение. Л. Машиностроение. 1975. № 6. С. 20-29.
2. Любимов М. Л. Спаи металла со стеклом. М.: Госэнергоиздат. 1957. 120 с.
3. Поляков Ю. А., Сазонов Ю. И. Скоростная индикация детонационных явлений в двигателях внутреннего сгорания // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2011. № 4. С. 11-15.
4. Баутин А. В., Поляков Ю. А. Система безопасности двигателей внутреннего сгорания на основе быстродействующего термопреобразователя // Труды 13-й научно-техн. конф. "Датчики и преобразователи информации...". М.: МГИЭМ. 2001. С. 148, 149.
5. Поляков Ю. А., Дегтярёв С. А. Исследование возможности предотвращения пожаровзрывоопасности дизелей-генераторов транспортного назначения // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2009. № 2. С. 44-52.

### References

1. Orlin A. S., Poljakov Ju. A., Sazonov Ju. I. Jeksperimental'noe issledovanie teploobmena mezhdz gazom i cilindrom vihrekamernogo dizelja pljonochnymi termometrami soprotivlenija (Experimental study of heat transfer between gas and cylinder swirl-chamber diesel film resistance) // Jenergomashinostroenie. L. Mashinostroenie. 1975. No 6. Pp. 20-29.
2. Ljubimov M. L. Spai metalla so steklom (Junctions of metal with glass). M.: Gosjenergoizdat. 1957. 120 p.
3. Poljakov Ju. A., Sazonov Ju. I. Skorostnaja indikacija detonacionnyh javlenij v dvigateljah vnutrennego sgoranija (High-speed readout of detonation phenomena in internal combustion engines) // Pozhary i chrezvychajnye situacii: predotvrashhenie, likvidacija. 2011. No 4. Pp. 11-15.
4. Bautin A. V., Poljakov Ju. A. Sistema bezopasnosti dvigatelej vnutrennego sgoranija na osnove bystrodejstvujushhego termopreobrazovatelja (Security System of the internal combustion engine on the basis of a high-speed thermocouple) // Trudy 13-j nauchno-tehn. konf. "Datchiki i preobrazovateli informacii...". M.: MGIIeM. 2001. Pp. 148, 149.
5. Poljakov Ju. A., Degtjarjov S. A. Issledovanie vozmozhnosti predotvrashhenija pozharovzryvoopasnosti dizelej-generatorov transportnogo naznachenija (Investigation of the possibility of prevention of fire and inflammation of diesels-generators transport purposes) // Pozhary i chrezvychajnye situacii: predotvrashhenie, likvidacija. 2009. No 2. Pp. 44-52.