

МИНИМИЗАЦИЯ ПОГРЕШНОСТИ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ТЕНЗОРЕЗИСТОРНЫХ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

Е.А. Мокров, Е.М. Белозубов, Д.В. Тихомиров

Рассмотрено влияние нестационарной температуры измеряемой среды на погрешность измерения. Предложена методика ее уменьшения более чем в 40 раз.

Характерной особенностью эксплуатации датчиков давления в жидкостных реактивных двигателях (ЖРД) является воздействие на них нестационарной температуры измеряемой среды, в наибольшей степени проявляющееся в переходных режимах работы двигателя. Автономные испытания, проведенные НИИФИ, показали, что аддитивная погрешность самых массовых и совершенных тонкопленочных датчиков давления Вм 206, Вм 212, используемых при отработке и штатной работе ЖРД при воздействии нестационарной температуры измеряемой среды, достигает 30 % от номинального выходного сигнала. У других датчиков эта погрешность еще больше. Превалирующее влияние неравномерности распределения температурного поля на погрешность измерений при традиционном проектировании чувствительных элементов (ЧЭ) датчиков подтверждается многолетними экспериментальными и теоретическими исследованиями.

На рис. 1, а, б упрощенно изображен ЧЭ датчика Вм 212 с размещенными на планарной поверхности мембраны тонкопленочными тензорезисторами $R1-R4$, соединенными в мостовую измерительную схему. Эпюры распределения радиальных ε_r и тангенциальных ε_t деформаций при воздействии давления изображены на рис. 1, в. Распределение температур на планарной поверхности мембраны при воздействии нестационарной температуры измеряемой среды на приемную полость датчика представлено на рис. 1, г. Тензорезисторы, подвергающиеся деформациям растяжения $R2, R4$, сравнительно с тензорезисторами, подвергающимися деформациям сжатия $R1, R3$, находятся в различных температурных условиях. Тензорезисторы $R2, R4$ и $R1, R3$ для обеспечения максимальной чувствительности датчика к измеряемому давлению должны быть включены в противоположные плечи мостовой измерительной схемы. При этом, даже при абсолютно одинаковых ТКС тензорезисторов, разница температур в зонах их размещения (достигающая, например, нескольких десятков градусов при скачкообразном изменении температуры от +20 до -196 °С) приводит к различному изменению сопротивлений противоположных плеч схемы.

НИИФИ разработаны, изготовлены и испытаны опытные образцы тонкопленочных тензорезисторных датчиков давления Вм 212 АЛ, имеющие минимальную погрешность в условиях воздействия нестационарной температуры измеряемой среды.

Отличительная особенность датчиков Вм 212 А.1 - выполнение радиальных и окружных тензорезисторов в виде идентичных элементов - квадратов, размещенных по периферии мембраны и соединенных низкоомными перемычками [1].

Расположение тензорезисторов на планарной стороне ЧЭ датчика Вм 212 А.1 изображено на рис. 2.

Датчик давления содержит упругий элемент в виде круглой жесткозашемленной мембраны 7, выполненной за одно целое с опорным основанием 2, на которой расположены соединенные в мостовую схему тензорезисторы, размещенные по дуге окружности 3 и по радиусу мембраны 4. Окружные Тензорезисторы выполнены в виде соединенных низкоомными перемычками 5 и равномерно размещенных по периферии мембраны идентичных резистивных квадратов 6. Каждый из квадратов касается двумя наиболее удаленными от центра мембраны вершинами 7 границы 8 раздела мембраны и опорного основания так, как это изображено на рис. 3. Датчик давления работает следующим образом.

При воздействии на мембрану давления в ней возникают радиальные и тангенциальные напряжения, которые приводят к появлению на планарной стороне мембраны радиальных ε_r и тангенциальных ε_t деформаций (см. рис. 3).

Так как резистивные квадраты касаются двумя наиболее удаленными от центра мембраны вершинами границы раздела мембраны и опорного основания, а также в связи с тем, что размеры сторон резистивных квадратов выбраны, исходя из определенного соотношения, резистивный квадрат окружного тензорезистора (рис. 3, вид I) подвергается воздействию растягивающих тангенциальных деформаций, направленных вдоль длины резистора, и сжимающих радиальных деформаций, направленных перпендикулярно длине резистора.

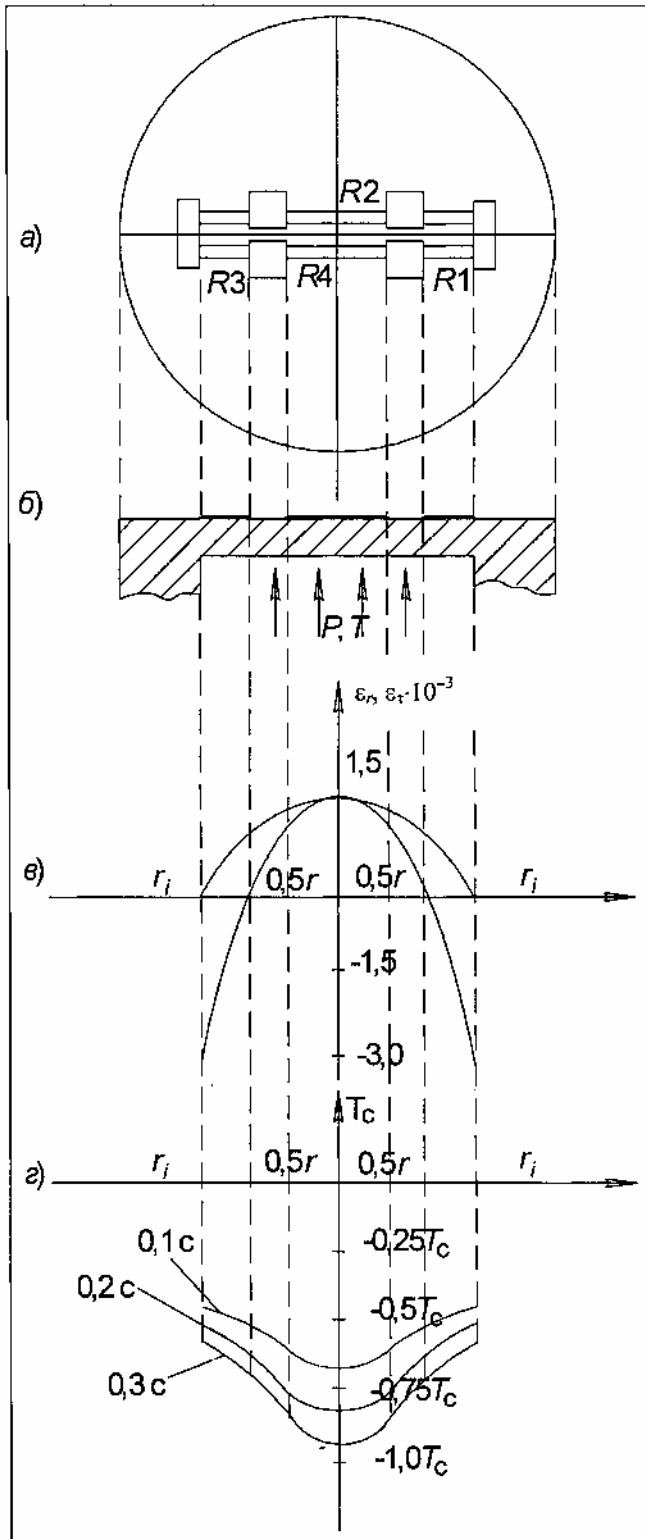


Рис. 1

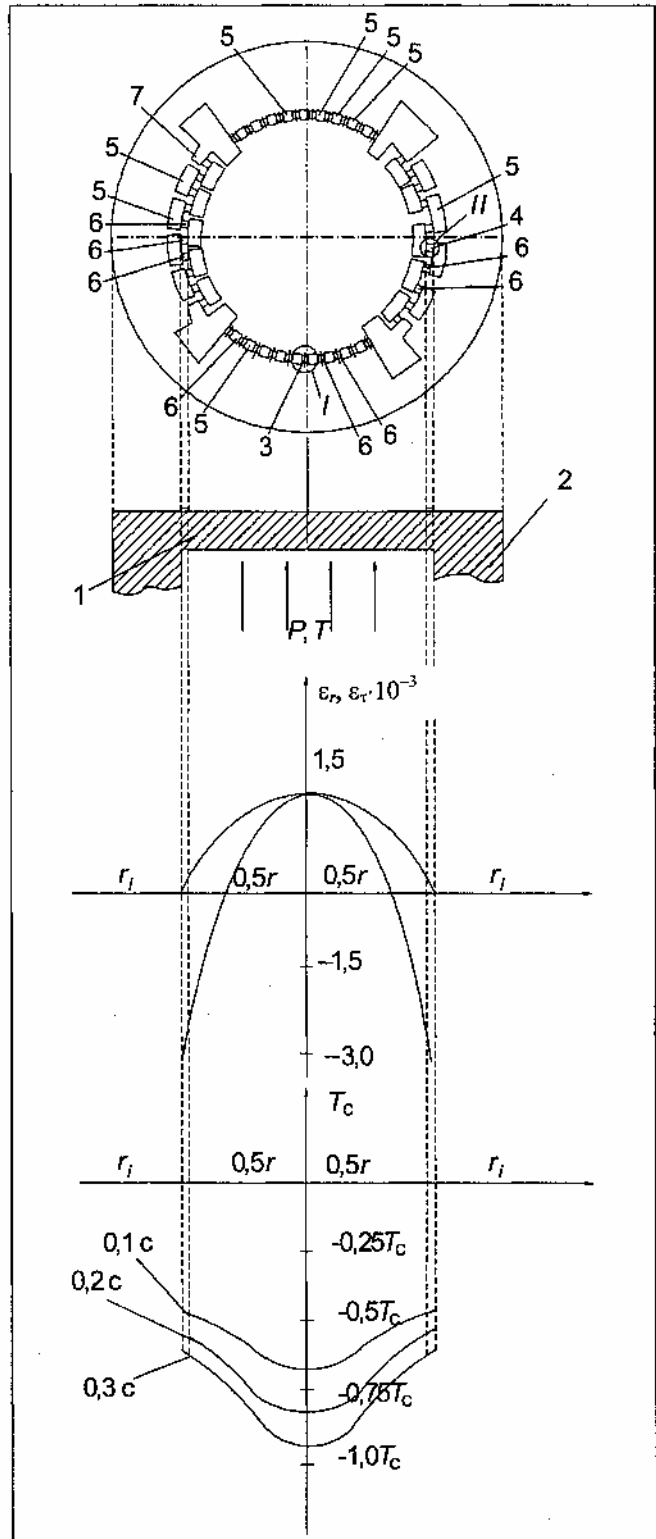


Рис. 2

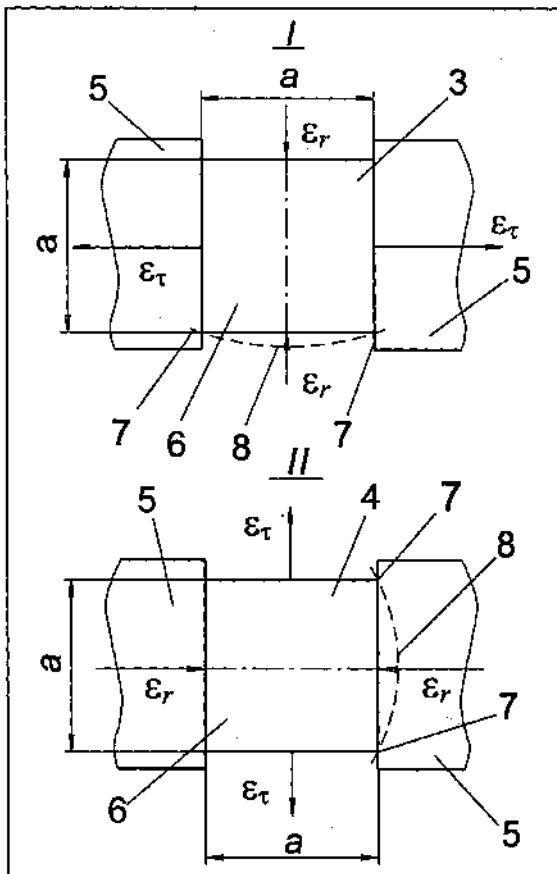


Рис.3

В результате воздействия таких деформаций сопротивление резистивного квадрата окружного тензорезистора увеличивается. Вследствие аналогичных причин резистивный квадрат радиального тензорезистора (рис. 3, вид II) подвергается воздействию растягивающих тангенциальных деформаций, направленных перпендикулярно длине тензорезистора, и сжимающих радиальных деформаций, направленных вдоль длины тензорезистора.

В результате воздействия таких деформаций сопротивление резистивного квадрата радиального тензорезистора уменьшается. В связи с тем, что окружные и радиальные тензорезисторы выполнены в виде последовательно соединенных низкоомными перемычками и равномерно размещенных по периферии мембраны идентичных квадратов, изменение сопротивления окружных и радиальных тензорезисторов будет равно сумме изменений сопротивлений соответствующих резистивных квадратов. Изменение сопротивлений противоположно включенных окружных и радиальных тензорезисторов преобразуется мостовой схемой в электрический сигнал, который поступает на выходные контакты датчика. При воздействии нестационарной температуры измеряемой среды (термоудара) на мембране возникает неравномерное поле температур.

На рис. 2 приведена зависимость распределения температуры на планарной стороне упругого элемента через 0,1с после подачи на мембрану датчика давления жидкого азота с температурой T_c . В связи с тем, что размеры сторон резистивных квадратов радиальных и окружных тензорезисторов одинаковы, а все резистивные квадраты своими наиболее удаленными от центра мембраны вершинами касаются границы раздела мембраны и опорного основания, несмотря на нестационарный характер изменения температуры на планарной стороне мембраны температура резистивных квадратов окружных и радиальных тензорезисторов (см. рис. 2), изменяясь со временем, будет одинакова в каждый конкретный момент времени. Одинаковая температура радиальных и окружных тензорезисторов, включенных в мостовую схему, в каждый конкретный момент времени вызывает одинаковые изменения их сопротивлений, которые взаимно компенсируются.

Так как радиальные деформации будут равны 0 при $r_{i0} = r/\sqrt{3}$, то с целью обеспечения нахождения резистивных квадратов в зоне максимального воздействия радиальных деформаций величина разности $r - r/\sqrt{3}$, характеризующая расстояние от опорного основания до точки, где радиальные деформации меняют знак (т. е. область отрицательных сжимающих значений радиальных деформаций), уменьшена в два раза. При этом резистивные квадраты оказываются расположенными в области максимальных отрицательных радиальных деформаций. В связи с тем, что размеры резистивных квадратов существенно меньше радиуса мембраны, можно сказать, что при выборе величины размера стороны квадрата меньше $0,5(r - r/\sqrt{3})$, резистивные квадраты заведомо попадают в области наибольших отрицательных радиальных деформаций. Вследствие существенно больших значений радиальных деформаций в периферийной области мембраны нежели радиальных деформаций в ее центре появляется возможность либо увеличения чувствительности (при сохранении неизменной перегрузочной способности), либо повышения перегрузочной способности (при сохранении неизменной чувствительности).

Вследствие того, что окружные и радиальные тензорезисторы выполнены в виде последовательно соединенных низкоомными перемычками и равномерно размещенных по периферии мембраны идентичных квадратов, касающихся двумя наиболее удаленными от центра мембраны вершинами границы раздела мембраны и опорного основания, а также в виду одинакового числа резистивных квадратов, мощность, выделяемая в каждом резистивном квадрате от напряжения питания, будет одинакова, как и одинакова температура перегрева относительно опорного основания каждого резистивного квадрата. Причем, так как все резистивные квадраты непосредственно примыкают к опорному основанию, условия отвода тепла от саморазогрева резистивных квадратов полностью идентичны.

Таким образом, выполнение тензорезисторов в виде идентичных тензоэлементов, имеющих форму квадрата и размещенных на периферии мембраны, позволяет обеспечить:

- полную идентичность температур радиальных и окружных тензорезисторов в условиях стационарной и нестационарной температур измеряемой среды;
- идентичность и улучшение условий рассеивания мощности;
- повышенную стойкость к воздействию перегрузочного давления при сохранении неизменной чувствительности, или повышенную чувствительность при сохранении неизменной перегрузочной способности.

Для устранения некорректности влияния низкоомных перемычек их конфигурация и размеры выполнены по определенным соотношениям, обеспечивающим идентичность их сопротивлений и одинаковое изменение сопротивлений тензорезисторов в процессе воздействия нестационарной температуры [2]

$$H_o = \frac{2H_p(L_{o\max} + L_{o\min})}{L_{1p\max} + L_{1p\min} + L_{2p\max} + L_{2p\min} + 2a - 2\pi^{-1}H_p \ln 0,5[ch(\pi a / H_p) - 1]}$$

где H_o , H_p — ширина перемычки, соединяющей соответственно окружные и радиальные тензорезисторы; $L_{o\max}$, $L_{o\min}$ — максимальная и минимальная длина перемычки, соединяющей окружные тензорезисторы; $L_{1p\max}$, $L_{1p\min}$ — то же для перемычки, соединяющей радиальные тензорезисторы; a — длина стороны тензо-резисторного квадрата.

Неидеальность осесимметричного распределения температурного поля при воздействии нестационарной температуры измеряемой среды и ограниченная точность реального выполнения элементов конструкции датчика в условиях серийного производства привели к необходимости дополнительных мер по уменьшению неравномерности температурного поля в зоне размещения тензорезисторов. В частности, в датчиках Вм 212А.1 использовано вакуумирование внутренней полости датчика [3]. Механизм влияния вакуумирования внутренней полости основан на чрезвычайно низкой теплопроводности вакуума, позволяющей существенно уменьшить теплообмен ЧЭ с ближайшими элементами конструкции датчика и благодаря этому выравнять распределение температуры в зоне размещения тензорезисторов. Кроме того, для уменьшения неравномерности температурного поля в зоне размещения тензорезисторов в датчиках Вм 212А.1 использован механизм выравнивания тепловых потоков, проходящих через мембрану и цилиндрическую часть ЧЭ, т. е. $P_m = P_c$.

Для упрощения расчетов принимаем во внимание, что толщина цилиндрической части упругого элемента значительно меньше ее длины, а толщина мембраны значительно меньше ее наружного диаметра, что соответствует реальным соотношениям. Тогда для расчета тепловых потоков можно воспользоваться формулами

$$P_{Ц} = \frac{t_{вн} - t_{н}}{R_{Ц}}, \quad P_{М} = \frac{t_{вн} - t_{н}}{R_{М}}$$

где $R_{Ц}$ и $R_{М}$ — соответственно термическое сопротивление цилиндрической части упругого элемента (УЭ) и его мембраны; $t_{вн} - t_{н}$ — разность температур внутренней и наружной поверхностей УЭ [4].

Равенство $P_{М} = P_{Ц}$ обеспечивается при $R_{М} = R_{Ц}$.

Термическое сопротивление мембраны [4] равно

$$R_{М} = \frac{1}{\alpha_{1М}} + \frac{H}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{2М}}, \quad (1)$$

где $1/\alpha_{1М}$, $1/\alpha_{2М}$ — термическое сопротивление теплопередачи от измеряемой среды к соприкасающейся с ней поверхности мембраны УЭ и с поверхности мембраны внутрь датчика соответственно; H — толщина мембраны; λ — коэффициент теплопроводности материалов упругого элемента.

Учитывая незначительную теплопередачу с поверхности цилиндрической части УЭ внутрь датчика вследствие вакуумирования корпуса, термическое сопротивление цилиндрической части упругого элемента определим по формуле [4]

$$R_{Ц} = \frac{1}{\alpha_{1Ц}} \cdot \frac{d_H}{d} + \frac{d_H}{2\lambda} \ln \frac{d_H}{d} + \frac{1}{\alpha_{2Ц}}, \quad (2)$$

где $1/\alpha_{1Ц}$, $1/\alpha_{2Ц}$ — термическое сопротивление теплопередачи от измеряемой среды к соприкасающейся с ней поверхности цилиндрической части УЭ и с поверхности цилиндрической части УЭ внутрь датчика соответственно; d_H — наружный диаметр цилиндрической части упругого элемента; d — внутренний диаметр цилиндрической части упругого элемента.

Приравняв выражения (1) и (2) и учитывая, что $d_H = d + 2h$, где h — толщина цилиндрической части, $1/\alpha_{1М} = 1/\alpha_{1Ц}$, $1/\alpha_{2М} = 1/\alpha_{2Ц}$, так как в обоих случаях в теплообмене участвуют одинаковые материалы (измеряемая среда - упругий элемент - вакуум), а также незначительное отличие отношения d_H/d от единицы, получим

$$H = \frac{d + 2h}{2} \ln \frac{d + 2h}{d} \quad (3)$$

Выражение (3) однозначно устанавливает соотношение между толщинами мембраны H и цилиндрической части h . Выражение простое в вычислении, но следует помнить, что толщина мембраны определяется, исходя из требуемой чувствительности, механической надежности и т. п., т. е. толщина мембраны, как правило, уже выбрана, поэтому необходимо получить соотношения между величинами h и H при определенном d ЧЭ. После элементарных операций получим выражение

$$h = \frac{H}{\ln((d + 2h)/d)} - \frac{d}{2}, \quad (4)$$

однозначно устанавливающее необходимую зависимость. Хотя величина h в соотношении (4) выражена неявно, она довольно просто находится методом последовательного приближения, особенно при применении средств вычислительной техники.

Кроме того, в датчиках Вм 212 А.1 использовано несколько "ноу-хау", принадлежащих НИИФИ. Результаты автономных испытаний датчиков Вм 212 А.1 показали, что их аддитивная погрешность в условиях воздействия нестационарной температуры измеряемой среды не превышает 0,7 %, что меньше погрешности серийно изготавливаемых датчиков более, чем в 40 раз.

После проведения испытаний датчиков в составе изделий и подготовки производства, НИИФИ приступит к серийному изготовлению датчиков, имеющих уменьшенную погрешность от воздействия нестационарной температуры измеряемой среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. № 1615578 (РФ). Датчик давления // Изобретения.
 2. Пат. № 1760410 (РФ). Датчик давления // Изобретения.
 3. Пат. № 2024829 (РФ). Датчик давления // Изобретения.
 4. Исаченко В.П. и др. Теплопередача. М.: Энергия, 1981.
- Мокров Евгений Алексеевич — ген. директор-гл. конструктор, д-р техн. наук;
Белозубов Евгений Михайлович — нач. группы;
Тихомиров Дмитрий Вячеславович — инженер.

ФГУП "Научно-исследовательский институт физических измерений".

Tel. (841-2) 63-89-19

E-mail: niifl@sura.ru

<http://www.niifl.sura.ru>