

Е. С. БАРБИН, Д. В. КОЗЛОВ, С. Ф. КОНОВАЛОВ, Ю. А. ПОНОМАРЁВ, М. С. ХАРЛАМОВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМОДЕФОРМАЦИИ КВАРЦЕВОГО ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА НА НУЛЕВОЙ СИГНАЛ АКСЕЛЕРОМЕТРА ТИПА Q-FLEX

В работе с использованием моделирования исследована термодформация кварцевого чувствительного элемента (ЧЭ) акселерометра Q-flex с различными технологическими отклонениями геометрии упругих перемычек с токоподводами в эксплуатационном диапазоне температур. Показано, что наибольший изгибающий момент в ЧЭ возникает при разнотолщинности и разнотолщинности токоподводов с лицевой и обратной сторон упругой перемычки. Разработан метод моделирования статических термоиспытаний с возможностью оценки изменения нулевого сигнала акселерометра с учетом несовершенств геометрии упругих перемычек ЧЭ. Выявлено, что температурный гистерезис и невозврат нулевого сигнала акселерометра связан с пластическими деформациями токоподводов вблизи предельных температурных нагрузок. Создана модификация ЧЭ со свободновисящими токоподводами, позволяющая, согласно результатам моделирования, достичь существенно меньших значений температурного коэффициента, гистерезиса и невозврата нулевого сигнала.

Ключевые слова: акселерометр Q-flex, температурная нестабильность, термодформация.

Введение

Акселерометры Q-flex [1] на сегодняшний день являются наиболее распространенными серийно изготавливаемыми датчиками, применяемыми в высокоточных инерциальных системах. При их использовании в системах автономной навигации, учитывая широкий диапазон эксплуатационных температур (от -55°C до 95°C), особые требования предъявляются к температурной стабильности нулевого сигнала акселерометра и его повторяемости от прибора к прибору при серийном производстве [2, 3].

Барбин Евгений Сергеевич. Кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Томский университет систем управления и радиоэлектроники; Институт оптики атмосферы им. В.К. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук (Томск).

Козлов Дмитрий Владимирович. Кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, АО «Российская корпорация ракетно-космического приборостроения и информационных систем» (АО «Российские космические системы») (Москва).

Коновалов Сергей Феодосьевич. Доктор технических наук, профессор, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (Москва). Действительный член международной общественной организации «Академия навигации и управления движением».

Пonomарёв Юрий Анатольевич. Кандидат технических наук, доцент, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана. Член секции молодых ученых международной общественной организации «Академия навигации и управления движением».

Харламов Максим Сергеевич. Инженер-исследователь, АО «Российские космические системы».

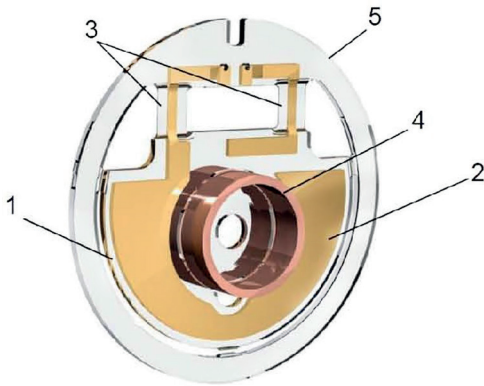


Рис. 1. ЧЭ акселерометра типа Q-flex:

- 1 – подвижная лопасть, 2 – металлизация,
- 3 – кварцевые упругие перемычки,
- 4 – катушка компенсационного датчика силы,
- 5 – неподвижное кольцо

Одним из возможных факторов, влияющих на температурную стабильность, является несовершенство технологических процессов формирования чувствительного элемента акселерометра (ЧЭ) (рис. 1), а именно напыления металла, которое приводит к отклонениям геометрии золотых токоподводов на упругих перемычках до 10% [4]. Это связано с возникновением изгибающего момента со стороны токоподводов на поверхности упругих перемычек из-за значительной разницы температурного коэффициента линейного расширения золота и кварца.

Экспериментальные исследования влияния таких особенностей ЧЭ на нулевой сигнал акселерометра Q-flex затруднены, так как отклонения размеров в указанном диапазоне имеют случайный характер, не поддаются прогнозированию и параметризации. В данной работе рассматривается влияние термодформации на температурную стабильность нулевого сигнала акселерометра в эксплуатационном диапазоне температур.

Моделирование термодформации ЧЭ

Расчетная область моделирования ограничена кварцевой упругой перемычкой с элементами перехода на толщину установочного кольца и подвижной лопастью ЧЭ с золотыми токоподводами с двух сторон (рис. 2).

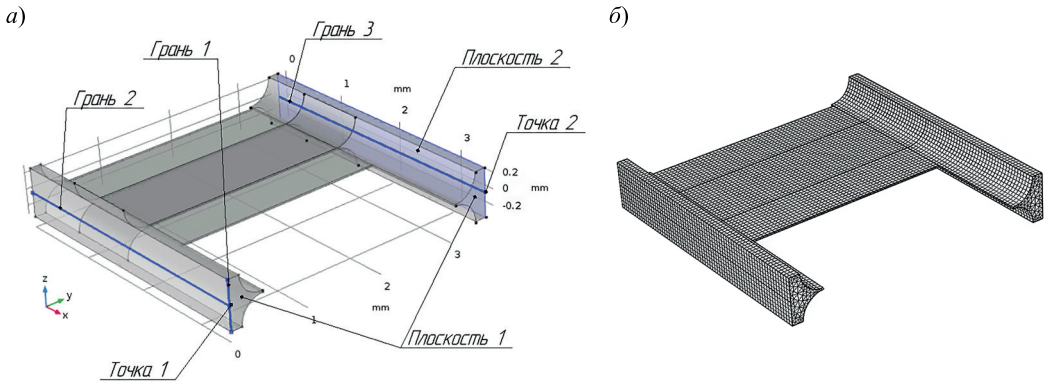


Рис. 2. Общий вид расчетной области упругой перемычки с токоподводами с элементами воздействия граничных условий (а) и сетка конечных элементов (б)

При моделировании использовались следующие граничные условия:

- симметрия к плоскости 1, позволяющая отразить модель относительно заданной плоскости и тем самым исследовать вариант ЧЭ с двумя перемычками;
- закрепление ЧЭ осуществляется посредством фиксации точки 1 и ограничения перемещения грани 1 по осям O_x и O_y ;

- элементы перехода из-за малого размера имеют малую жесткость относительно реального ЧЭ по оси O_y , поэтому для увеличения их жесткости к грани 2 и грани 3 применяется ограничение на деформацию.

Заданные условия имитируют закрепление ЧЭ в корпусе акселерометра без воздействия на него компенсационной силы. Температура нулевой деформации принята равной 32°C , что соответствует разогреву ЧЭ при напылении 300 нм золота из-за рассеяния кинетической энергии атомов металла на поверхность кварца. Эта температура зависит от таких особенностей процесса напыления, как расстояние между подложкой и источником, длительность процесса и мощность источника [16].

К термдеформации ЧЭ вдоль измерительной оси O_z в первую очередь приводят несовершенства геометрии, вызванные технологическими погрешностями процесса изготовления, при которых изгибающий момент от токоподводов с лицевой и обратной сторон переключки не будет взаимно скомпенсирован. Описанное нарушение симметрии может быть вызвано следующими конструктивно-технологическими отклонениями, учтенными в расчетной области:

- рассовмещение токоподводов с лицевой и обратной сторон относительно друг друга (100 мкм) (рис. 3, б), обусловленное несовершенством позиционирования масок-трафаретов при процессе напыления;
- разнотолщинность токоподводов с лицевой и обратной сторон напыления (10% от номинального значения 300 нм) (рис. 3, в), связанная с неравномерностью скорости процесса;
- разноширинность токоподводов с лицевой и обратной сторон (10% от номинального значения 900 мкм) (рис. 3, г), связанная с отклонением размеров масок-трафаретов и значительным зазором между маской и заготовкой в процессе напыления.

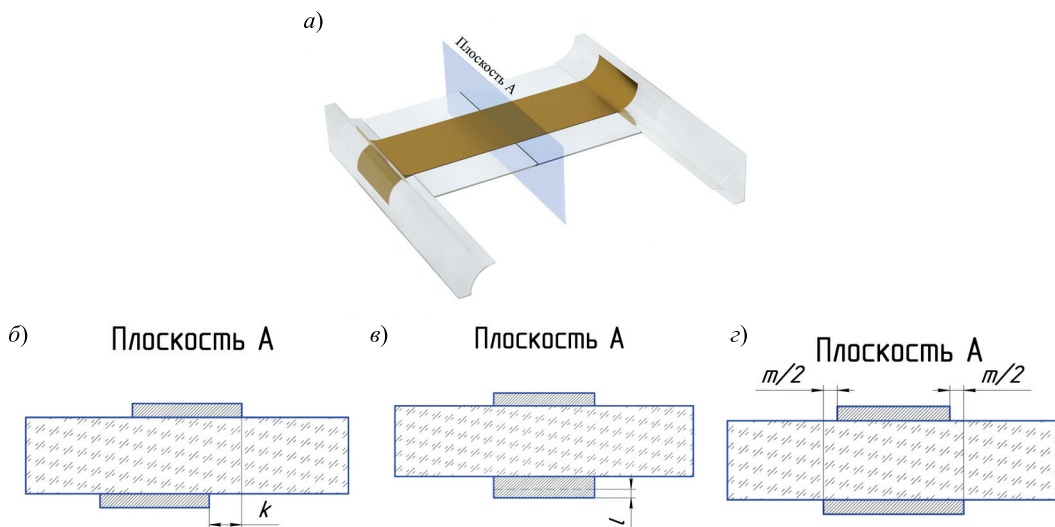


Рис. 3. Общий вид упругой переключки ЧЭ (а) и виды сечений с различными конструктивно-технологическими отклонениями: б – рассовмещение токоподводов, в – разнотолщинность токоподводов, г – разноширинность токоподводов

В ходе моделирования учитывалось влияние температуры на тепломеханические характеристики материалов [5–10], их значения приведены в табл. 1.

Тепломеханические характеристики аморфного кварца и золота в диапазоне температур от -55°C до 95°C

Материал	ТКЛР, ppm/ $^{\circ}\text{C}$	Упругопластические свойства	Коэффициент Пуассона
Аморфный кварц	от 0,23 до 0,6	71,4 ГПа (модуль Юнга)	0,17
Золото	от 14,06 до 14,33	Кривые «напряжение – деформация» (рис. 4)	0,42

Упругопластические свойства золота для фиксированной температуры описываются кривой «напряжение–деформация». Данные кривые имеют линейный вид ниже предела упругости (тангенс угла наклона к горизонтальной оси соответствует модулю Юнга) и нелинейную зависимость в области пластических деформаций выше этого предела (рис. 4) [5–9].

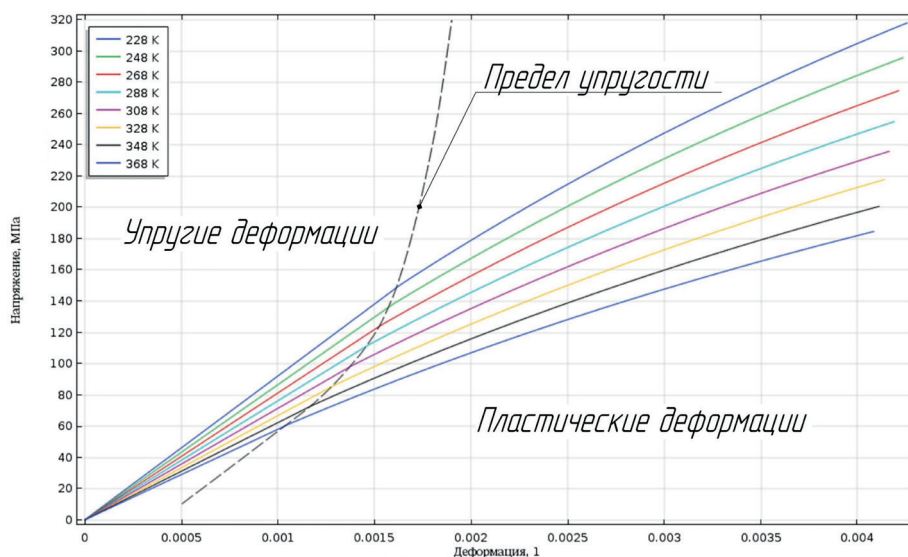


Рис. 4. Кривые «напряжение–деформация» для золота при различных температурах [5–9]

Для оценки возникающего изгибающего момента на первом этапе моделирования определялась деформация упругих балок с токоподводами с различными отклонениями размеров при предельной температурной нагрузке ($\Delta T = -55^{\circ}\text{C} - 32^{\circ}\text{C} = -87^{\circ}\text{C}$). Результаты моделирования показали, что максимальные отклонения лопасти вдоль измерительной оси возникают при разнотолщинности и разноширинности токоподводов и превышают 2 мкм (рис. 5). Это говорит о возникновении значительного изгибающего момента со стороны токоподводов с отклонением их толщины и ширины, показанным на рис. 3.

Отдельный интерес представляют значения возникающих в токоподводах напряжений при термодформации упругой переключки. Во время работы акселерометра на подвижную лопасть ЧЭ воздействует компенсационная сила, исключаяющая ее отклонение по оси O_z . На рис. 6 показана деформация переключки с учетом воздействия компенсационной силы для случаев разнотолщинности и разноширинности токоподводов.

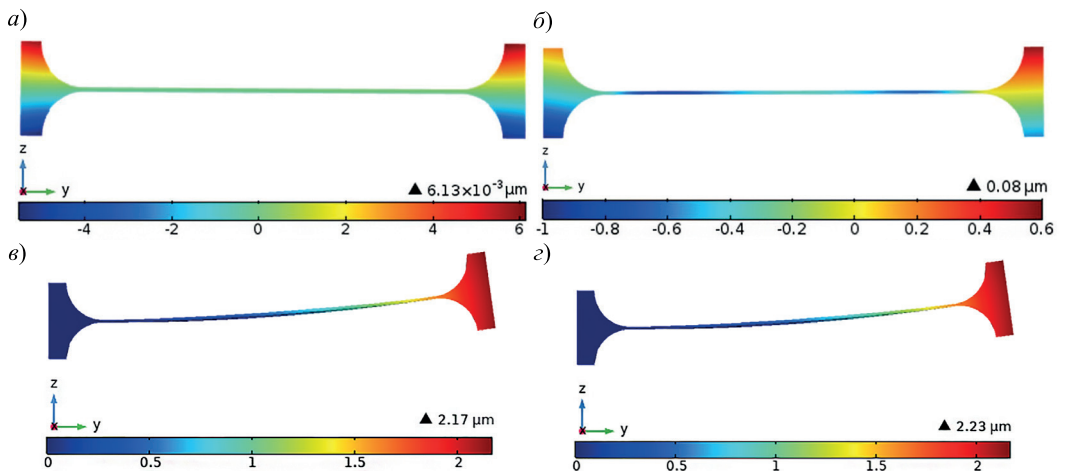


Рис. 5. Профиль термдеформации упругих перемычек при температуре -55°C с незакрепленной подвижной частью для различных технологических несовершенств (коэффициент отображаемой деформации $\times 150$):
 а – без отклонений, б – рассовмещение токоподводов, в – разнотолщинность токоподводов, г – разноширинность токоподводов

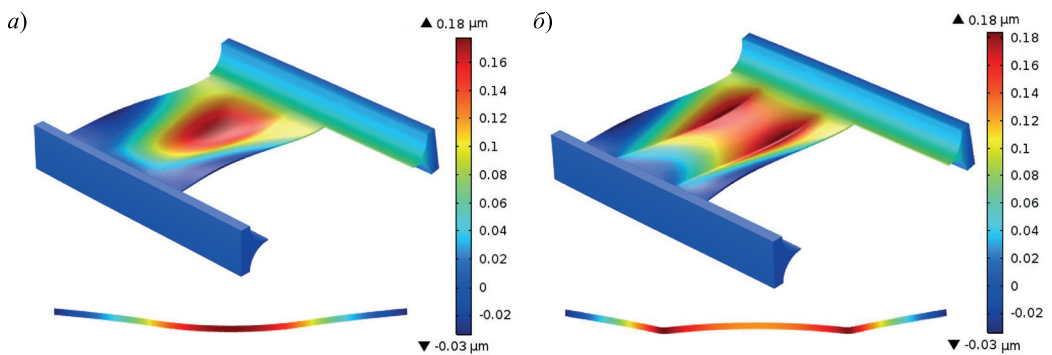


Рис. 6. Вид и профиль деформации упругой перемычки при температуре -55°C с учетом компенсационного воздействия для случаев разнотолщинности (а) и разноширинности (б) токоподводов (коэффициент отображаемой деформации $\times 1000$)

При деформации упругих перемычек с токоподводами металл испытывает напряжения, значения которых, согласно полученным результатам моделирования, превышают предел упругости (табл. 2). Это может привести к остаточным деформациям при термоциклировании ЧЭ и появлению гистерезиса.

Т а б л и ц а 2

Сравнение минимальных напряжений в токоподводах для разнотолщинности и разноширинности при предельных эксплуатационных температурах

Температура	Предел упругости	$\sigma_{\text{мин}}$ для разнотолщинности	$\sigma_{\text{мин}}$ для разноширинности
-55°C	155 МПа	181 МПа	179 МПа
95°C	60 МПа	80,1 МПа	79,6 МПа

Моделирование статических термоиспытаний

Температурная стабильность нулевого сигнала акселерометра исследуется, как правило, с помощью проведения статических температурных экспериментов, когда прибор подвергается циклическим ступенчатым нагревам и охлаждениям в пределах рабочего диапазона температур с выдержкой в течение времени, необходимого для получения установившегося температурного распределения в корпусе прибора [11]. При этом график изменения нулевого сигнала от температуры $a_0(T)$ для рассматриваемых приборов обычно выглядит так, как показано на рис. 7, где тангенс угла наклона прямой АВ – температурный коэффициент нулевого сигнала $a_{0к}$, а значения $a_{0г}$ и $a_{0н}$ – температурный гистерезис и невозврат нулевого сигнала.

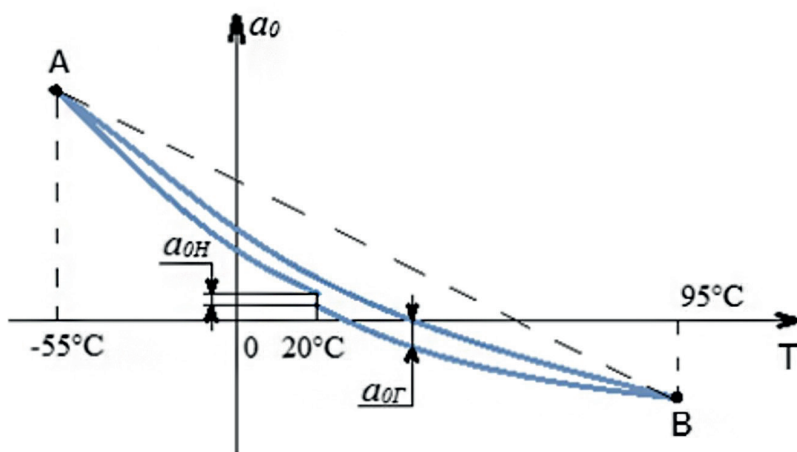


Рис. 7. Типовой график $a_0(T)$, регистрируемый при экспериментах на статическое температурное воздействие

Для исследования зависимости нулевого сигнала акселерометра от температуры $a_0(T)$ была разработана конечно-элементная модель, имитирующая статические термоиспытания акселерометра. Для создания компенсационной силы, имитирующей работу магнитоэлектрической системы обратной связи акселерометра, введено комплексное граничное условие. Оно применяется к точке 2 (рис. 2, а) и заключается в том, что при отклонении этой точки вдоль измерительной оси акселерометра (ось O_z) прикладывается усилие, необходимое для возвращения ее в нулевое положение. К плоскости 2 (рис. 2, а) приложено граничное условие «добавленной массы», при котором имитируется масса подвижной лопасти ЧЭ и катушек системы обратной связи реального акселерометра. Отношение компенсационной силы к массе расчетной области может рассматриваться как нулевой сигнал акселерометра. Такой подход позволяет не использовать мультифизическое моделирование, что значительно упрощает расчет. Проведенная оценка точности расчета показала, что ошибка моделирования не превышала 5 ppm.

На рис. 8 представлены графики зависимости $a_0(T)$ для различных конструктивно-технологических отклонений геометрии упругой перемычки с токоподводами (для случаев 3 и 4 токоподводы с отклонением размера выполнены с разных сторон перемычки).

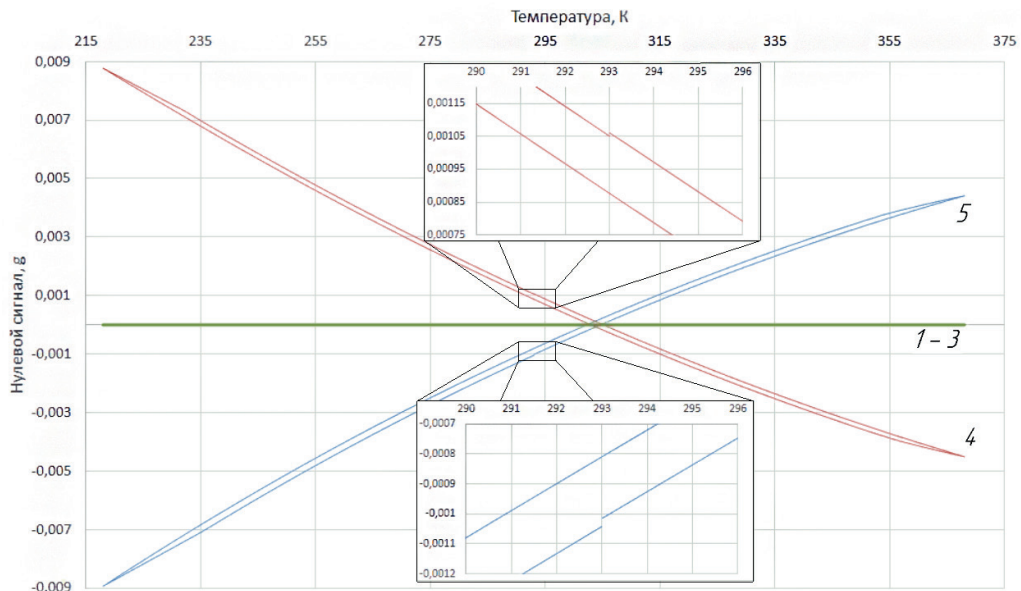


Рис. 8. Графики $a_0(T)$, полученные при моделировании статических термоиспытаний для ЧЭ с конструктивно-технологическими отклонениями геометрии кварцевой упругой перемычки с токоподводами: 1 – вариант без отклонений, 2 – рассовмещение токоподводов, 3 – разнотолщинность токоподводов, 4 – разноширинность токоподводов

Для случаев без конструктивно-технологических отклонений, а также с рассовмещением токоподводов и смещением перемычки относительно средней плоскости ЧЭ графики $a_0(T)$ имеют линейный вид и совпадают с осью O_x , а a_{0K} , $a_{0Г}$, a_{0H} в этом случае, соответственно, равны нулю. Стоит отметить, что в реальных приборах зависимостей 1, 2 не наблюдается, например из-за наличия температурного дрейфа нуля усилителя компенсационного контура. Для разнотолщинности и разноширинности токоподводов $a_0(T)$ приобретает вид незамкнутой петли гистерезиса, из которой можно определить значения a_{0K} , $a_{0Г}$, a_{0H} (рис. 7). Данные о значениях a_{0K} , $a_{0Г}$, a_{0H} для ЧЭ с разнотолщинностью и разноширинностью токоподводов представлены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Значения a_{0K} , $a_{0Г}$, a_{0H} при моделировании статических термоиспытаний для ЧЭ с разнотолщинностью и разноширинностью токоподводов

Конструктивно-технологическое отклонение	a_{0K} , мкг/К	$a_{0Г}$, мкг	a_{0H} , мкг
Разнотолщинность токоподводов	88,4	184,3	10,2
Разноширинность токоподводов	89,0	232,6	26,8

Вблизи точек максимальных и минимальных рабочих температур (ниже -38°C и выше $80,5^{\circ}\text{C}$) напряжения в металле превышают предел упругости, появляются пластические деформации золота, приводящие к возникновению температурного гистерезиса и невозврату нулевого сигнала после возвращения температуры к ис-

ходному состоянию. Благодаря малым пластичным деформациям разрушений токоподводов при работе датчика не наблюдается, что также подтверждается многолетним опытом эксплуатации серийных изделий.

Стоит отметить, что в данном случае проанализирован только вклад технологических погрешностей ЧЭ в температурную стабильность нулевого сигнала акселерометра. В реальном приборе на этот параметр могут оказывать влияние и другие, не рассматриваемые в данной работе факторы.

Модифицированные варианты ЧЭ

Одним из возможных вариантов улучшения температурной стабильности нулевого сигнала акселерометра при разнотолщинности или разноширинности токоподводов может быть снижение плеча изгибающего момента. Известен вариант конструкции ЧЭ [12], в котором токоподводы располагаются в углублениях с обеих сторон упругой перемычки вблизи ее средней плоскости (нейтральной плоскости изогнутой балки) (рис. 9).

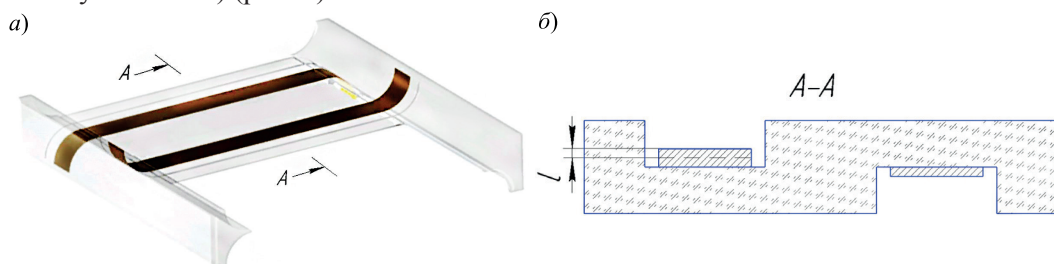


Рис. 9. Общий вид упругой перемычки с токоподводами в углублениях (а) и вид ее сечения с разнотолщинностью токоподводов (б)

Результаты моделирования термдеформации такого ЧЭ с разнотолщинностью токоподводов продемонстрировали, что максимальное отклонение лопасти (без компенсационной силы) не превышает нескольких десятков нанометров (рис. 10, а), что на 2 порядка меньше, чем для ЧЭ без углублений (рис. 5, в). Однако при наличии компенсационной силы упругая перемычка подвергается большим поперечным деформациям (рис. 10, б), чем для ЧЭ исходной конструкции из-за меньшей толщины кварца под металлической пленкой.

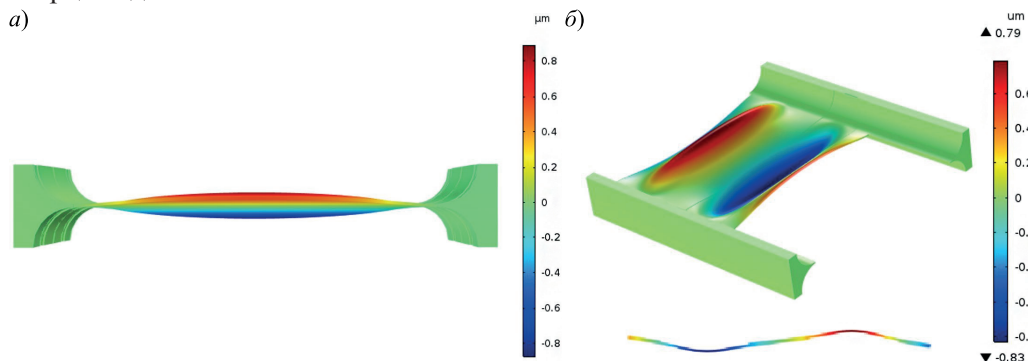


Рис. 10. Профиль (а) и общий вид (б) термдеформации упругих перемычек с токоподводами в углублениях при температуре -55°C (коэффициент отображаемой деформации $\times 100$)

Одним из наиболее эффективных вариантов решения задачи повышения температурной стабильности акселерометра Q-flex может быть размещение токоподводов ЧЭ таким образом, чтобы они не контактировали с кварцевыми упругими перемычками. Авторами разработаны конструктивно-технологические варианты ЧЭ со свободновисящими тонкопленочными токоподводами с прямым и гофрированным профилем по технологии напыления с последующим удалением жертвенного участка кварца. Установлено, что прямые токоподводы испытывают большие напряжения при охлаждении ЧЭ, что негативно влияет на работу прибора. В результате выбран вариант токоподводов с гофрированным профилем (рис. 11).

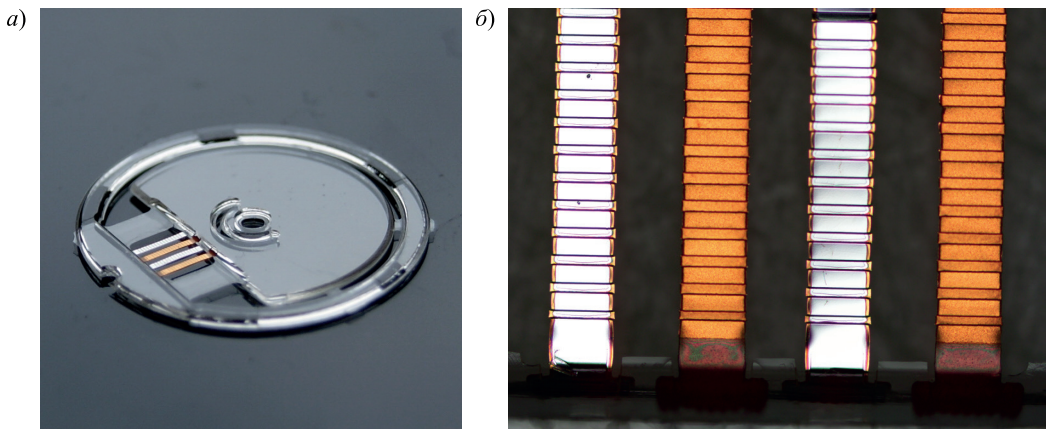


Рис. 11. Фото ЧЭ со свободновисящими гофрированными токоподводами (а) и увеличенное фото свободновисящих гофрированных токоподводов (б)

Для рассмотренных вариантов ЧЭ проведено моделирование статических термоиспытаний в случае разнотолщинности токоподводов по методике, описанной в предыдущем разделе. Результаты моделирования и их сравнение с исходной конструкцией ЧЭ представлены на рис. 12.

В табл. 4 представлены характеристики a_{0K} , $a_{0Г}$, $a_{0Н}$, полученные при моделировании ЧЭ с исходными токоподводами и ЧЭ с предложенными свободновисящими гофрированными токоподводами для случая разнотолщинности.

Т а б л и ц а 4

Значения a_{0K} , $a_{0Г}$, $a_{0Н}$

Вариант ЧЭ	a_{0K} , мкг/К	$a_{0Г}$, мкг	$a_{0Н}$, мкг
Токоподводы на поверхности упругих перемычек (ширина 290 мкм, толщина 0,3 мкм)	29,1	55,4	8,0
Токоподводы в углублениях упругих перемычек (ширина 290 мкм, толщина 0,3 мкм)	3,44	8,57	4,28
Свободновисящие гофрированные токоподводы (ширина 290 мкм, толщина 2 мкм)	1,12	0,86	0,8

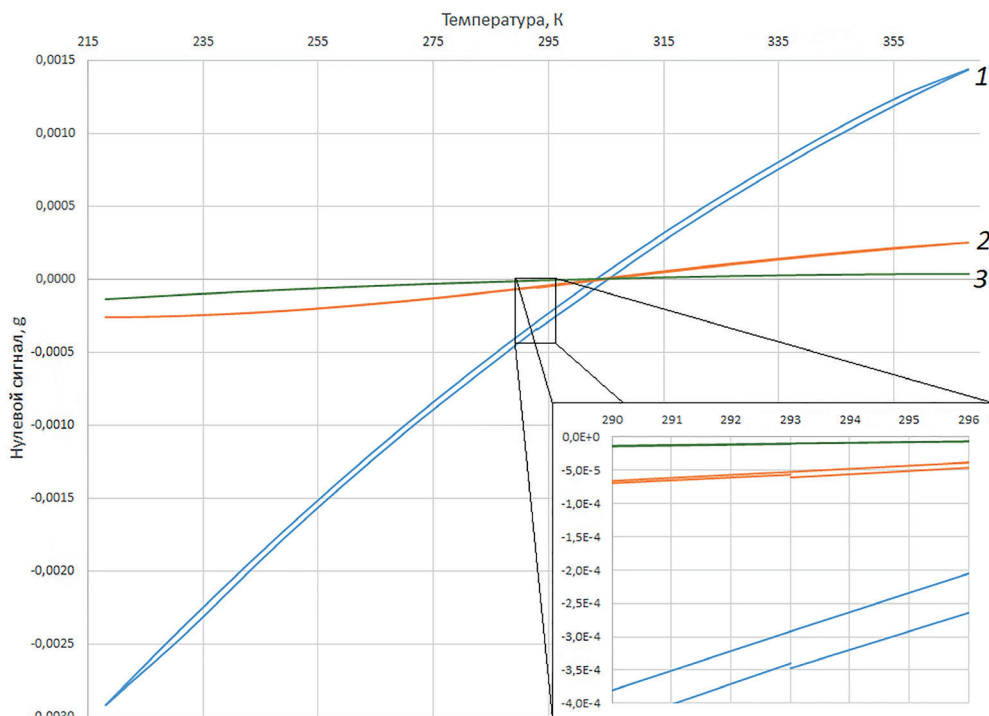


Рис. 12. График $a_0(T)$, полученный при моделировании статических термоиспытаний для ЧЭ с токоподводами на поверхности упругих перемычек (1), с токоподводами в углублениях упругих перемычек (2) и со свободновисящими гофрированными токоподводами (3) с разнотолщиной (ширина токоподводов во всех случаях составляет 290 мкм)

Заключение

В работе с использованием моделирования исследованы термдеформации кварцевого ЧЭ с различными технологическими несовершенствами в эксплуатационном диапазоне температур. Показано, что наибольший изгибающий момент в ЧЭ возникает при разнотолщинности и разноширинности токоподводов с лицевой и обратной сторон упругой перемычки. Разработана модель, имитирующая статические термоиспытания с возможностью оценки изменения нулевого сигнала акселерометра с учетом несовершенств геометрии упругих перемычек ЧЭ. Показано, что температурный гистерезис и невозврат нулевого сигнала акселерометра обусловлены пластическими деформациями токоподводов. Разработана модифицированная конструкция ЧЭ со свободновисящими токоподводами, моделирование которой продемонстрировало, что существует возможность уменьшить значения температурного коэффициента, гистерезиса и невозврата нулевого сигнала более чем на 1 порядок по сравнению с ЧЭ с токоподводами на поверхности упругих перемычек. Изготовлены экспериментальные образцы, которые подтвердили возможность реализации предложенных технических решений.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Pat. US3702073 (A)**, G01P15/13, Accelerometer / Earl D. Jacobs; Sundstrand Data Control Inc. 07.11.1972, p. 8/
2. **Jing-Min Gao et al.**, Temperature characteristics and error compensation for quartz flexible accelerometer, *International Journal of Automation and Computing*, 2015, 12(5), 540–550, doi: 10.1007/s11633-015-0899-5.
3. **Минкин А.М.** Технологические основы формообразования чувствительного элемента из кварцевого стекла методом химического травления через текстурированное молибденовое покрытие: дис. ... канд. техн. наук: Пермский национальный исследовательский политехнический университет. Пермь, 2020. 116 с.
4. **Weibin Yang et al.**, A temperature compensation model for low cost quartz accelerometer and its application in tilt sensing, *Mathematical problems and engineering*, volume 2016, article ID 2950376, 10 p., <http://dx.doi.org/10.1155/2016/2950376>.
5. **Birleanu, C. et al.**, Temperature effect on the mechanical properties of gold nano films with different thickness, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2016, 147, 012021, doi:10.1088/1757-899X/147/1/012021.
6. **Hodge, Th.C. et al.**, Stress in thin film metallization, *IEEE transactions on components, packaging and manufacturing technology – part A*, 1997, vol. 20, no. 2, pp. 241–250.
7. **Nastaran Ghazi Esfahani.** Investigation of plastic strain recovery and creep in thin film nanocrystalline metals, Submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in the Graduate School of Arts and Sciences Columbia university, 2014, 119 p.
8. **Chang-Wook Beak et al.**, Mechanical characterization of gold thin films based on strip bending and nanoindentation test for MEMS/NEMS application, *Sensors and Materials*, 2005, vol. 17, no. 5, pp. 277– 288.
9. **Pamato, M.G. et al.**, The thermal expansion of gold: point defect concentrations and pre-melting in face-centered cubic metal, *J. Appl. Cryst.*, 2018, 51, 470–480, doi: 10.1107/S1600576718002248.
10. **Schmelzer, J.W.P.**, *Glass: selected properties and crystallization*, Berlin, 2014. 588 p.
11. **Денисов С.Ю., Акилин В.И.** Технологические методы повышения точностных характеристик кварцевых акселерометров // Навигация и управление летательными аппаратами. 2016. №15. С. 17–31.
12. **Pat. US4400979 (A)**, G01L1/00; G01L1/14; G01L1/26; G01P15/13, Force transducer flexure with conductors on surfaces in the neutral bending plane / Hanson Richard A., Atherton Kim W.; Sundstrand Data Control Inc. 30.08.1983, p. 8.
13. **Пат. RU2731652 (C1), G01P15/135.** Маятниковый компенсационный акселерометр / С.Ф. Коновалов, Д.В. Майоров, Ю.А. Пономарёв, В.Е. Чулков, А.Е. Семёнов, М.С. Харламов; Коновалов С.Ф. № RU20190107343; заявл. 15.03.2019; опубл. 07.09.2020, Бюл № 25. 27 с.
14. **Коновалов С.Ф., Майоров Д.В., Семёнов А.Е., Пономарёв Ю.А., Чулков В.Е., Малыхин А.А., Харламов М.С., Малыхин Д.А.** Температурный дрейф и нестабильность нулевого сигнала маятниковых компенсационных Q-flex акселерометров // XXVII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. 2020. С. 237–243.
15. **Бом С. Дж.** Оптимизация параметров и моделирование рабочих режимов в компенсационных акселерометрах типа Q-flex и Si-flex: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2012. 239 с.
16. **Лучкин А.Г.** Температурный режим нанесения тонкопленочных покрытий на полимеры методом магнетронного распыления // Вестник Казанского технологического университета. 2011. №16. С. 121–125.

Barbin, E.S. (Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics; Zuev Institute of Atmospheric Optics of Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia), **Kozlov, D.V.** (Russian Space Systems, Moscow, Russia), **Kononov, S.F., Ponomarev, Yu.A.** (Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia), and **Kharlamov, M.S.** (Russian Space Systems)
Simulating the Effect of Quartz Sensor Thermal Deformation on Q-Flex Accelerometer Zero Shift, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2022, vol. 30, no. 1 (116), pp. 61–72.

Abstract. In the paper, simulation is used to study the thermal deformation of Q-flex accelerometer quartz sensitive element (SE) with technological geometrical deviations of elastic beams with conductors within the operation temperature range. It has been shown that the largest bending moment in the SE appears when conductors from the front and back sides of elastic beam have different thickness and width. A method for static thermal tests simulation has been developed, which allows estimation of accelerometer zero shift with account for the geometrical imperfections of SE elastic beams. It has been revealed that the thermal hysteresis and non-repeatability of accelerometer zero shift are due to the plastic strain of conductors under near-boundary temperature loads. A SE modification with loose conductors has been developed, which, according to the simulation results, improves the thermal coefficient, hysteresis, and repeatability of zero shift.

Key words: Q-flex accelerometer, thermal instability, thermal deformation.

Материал поступил 22.07.2021