

Температурные дрейф и нестабильность нулевого сигнала маятниковых компенсационных акселерометров

С.Ф. Коновалов
МГТУ им. Н. Э. Баумана
Москва, Россия
sercon@bk.ru

Д.В. Майоров
МГТУ им. Н. Э. Баумана
Москва, Россия
maord1@yandex.ru

А.Е. Семенов
МГТУ им. Н.Э. Баумана
Москва, Россия
salex@lenta.ru

Ю.А. Пономарев
МГТУ им. Н. Э. Баумана
Москва, Россия
quayside@mail.ru

В.Е. Чулков
МГТУ им. Н. Э. Баумана
Москва, Россия
vechulkov@bmsu.ru

А.А. Малыхин
МГТУ им. Н. Э. Баумана
Москва, Россия
sanandr13@gmail.com

М.С. Харламов
МГТУ им. Н.Э. Баумана
Москва, Россия
maskimosik@mail.ru

Д.А. Малыхин
МГТУ им. Н.Э. Баумана
Москва, Россия

Аннотация—основные проблемы создания высокоточных акселерометров навигационного класса состоят в обеспечении стабильности и воспроизводимости двух параметров: нулевого сигнала и масштабного коэффициента. Опыт разработки и исследования кварцевых и кремниевых акселерометров (Q-flex и Si-flex) позволяет выявить основные причины возникновения нестабильности и невоспроизводимости указанных параметров. Главные из них заключаются в следующем:

- наличие таких погрешностей изготовления балок упругого подвеса лопасти маятника, как неплоскостность, шероховатость поверхности, смещение плоскости балок от общей плоскости (как параллельное смещение, образующее коробчатую структуру, так и угловые повороты балок);
- деформация и искажение формы балок при напылении металла токоподводов;
- неоднородность структуры материала магнитопровода и полюсного наконечника плунжерного моментного датчика прибора;
- структурные изменения материала магнитопровода в процессе эксплуатации прибора, в первую очередь в процессе циклического изменения рабочей температуры.

Ряд погрешностей акселерометров, связанных с особенностями используемых для изготовления деталей приборов супер инваров и кварца, а также с особенностями технологических процессов, приводит к появлению скачкообразных изменений нулевого сигнала и масштабного коэффициента, которые, очевидно, не поддаются алгоритмической компенсации.

В докладе приводится описание ряда экспериментальных наблюдений, проведенных с Q-flex акселерометрами различных производителей, дается анализ причин возникновения погрешностей и приводятся рекомендации по исключению возможности возникновения рассмотренных погрешностей.

Ключевые слова—маятниковый акселерометр, Q-flex акселерометр, масштабный коэффициент, нулевой сигнал, стабильность масштабного коэффициента, стабильность нулевого сигнала, супер инвар, токоподводы, напыление

I. ВВЕДЕНИЕ. СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ НАВИГАЦИОННЫХ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ

В условиях эксплуатации навигационных акселерометров обычно указываются требования к обеспечению точности при работе в условиях циклически изменяющейся температуры, например при изменении температуры в диапазоне от минус 60°C до +80°C. Кроме того, указывается скорость изменения работоспособности приборов в этих условиях принято проводить статические температурные испытания, при которых температура ступенчато изменяется от одного номинала к другому. Приборы выдерживаются при каждой температуре до прекращения дрейфа в их показаниях (обычно около 1 часа) и затем фиксируется выходной сигнал прибора, по которому определяется изменение нулевого сигнала, масштабного коэффициента, базовых ошибок и т.д.

Обычно изменения выходного сигнала (например нулевого сигнала – U_0) имеют вид узкой гистерезисной петли, показанной на рис. 1.

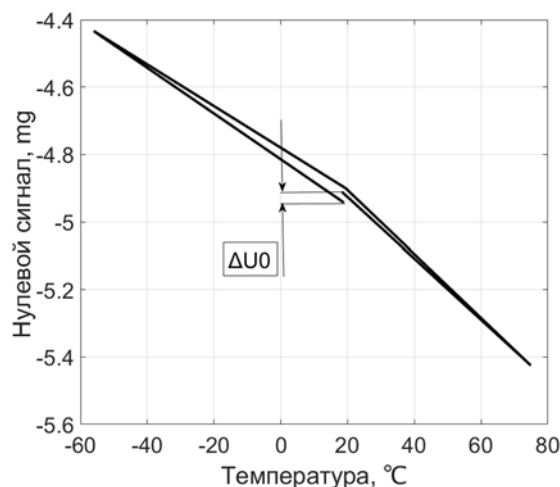


Рис.1. Гистерезисная петля при статических температурных испытаниях (последовательность температур: +20°C, -55°C, +20°C, +75°C, +20°C)

По наклону гистерезисной петли определяются зависимости нулевого сигнала от температуры $U_0(t^\circ)$, масштабного коэффициента от температуры $SF(t^\circ)$ и иных параметров. Их представляют в виде степенных рядов и используют полученные зависимости для алгоритмической компенсации температурных погрешностей приборов. Часто гистерезисная петля получается незамкнутой. Ошибка ΔU_0 – ошибка неповторяемости или невоспроизводимости у прецизионных акселерометров, например типа QA-3000 [1], может составлять порядка единиц ppm по масштабному коэффициенту и порядка единиц мкг по невоспроизводимости нулевого сигнала. Именно эти погрешности определяют точностные характеристики акселерометров и следовательно цену приборов.

Помимо статических температурных испытаний акселерометры подвергаются так называемым динамическим температурным испытаниям, при которых испытуемый прибор помещается в температурную камеру, температура в которой изменяется по синусоидальному закону, например, в диапазоне от минус 50°C до $+70^\circ\text{C}$, с периодом порядка 3 часов, и определяются температурные изменения нулевого сигнала и масштабного коэффициента. Вид выходного сигнала при этом имеет вид гистерезисной петли, показанной на рис.2, ширина которой значительно превышает ширину статической кривой и зависит от различия времени прохождения тепла (холода) извне к термодатчику прибора и его конструктивным элементам, определяющим точностные характеристики (маятнику, магнитопроводу, магниту и т.д.).

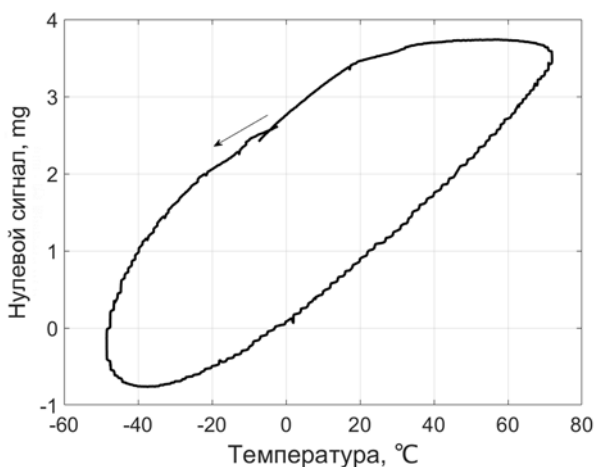


Рис.2. Гистерезисная петля при динамических температурных испытаниях

Гистерезисные петли при динамических испытаниях получаются достаточно широкими, и по ним не определяются ошибки невоспроизводимости (неповторяемости). При этом, в зависимости от положения измерительной оси прибора по отношению к вертикали, по наклону петли определяется погрешность изменения нулевого сигнала U_0 , реже масштабного коэффициента и оценивается возможность алгоритмической компенсации температурной погрешности прибора по показаниям температурного датчика.

В ряде случаев, при проведении динамических температурных испытаний регистрируются строго повторяющиеся в каждом периоде изменения температуры скачкообразные изменения нулевого сигнала U_0 . Они могут

наблюдаться как при положительных температурах (рис.3), так и при отрицательных (рис.4).

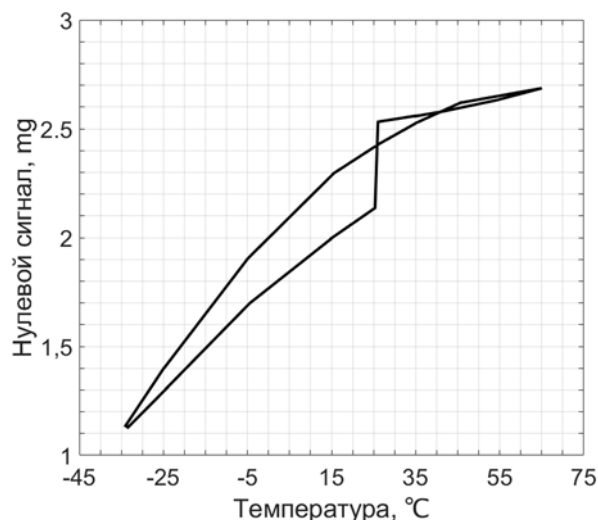


Рис.3. Скачок нулевого сигнала при положительной температуре[2]

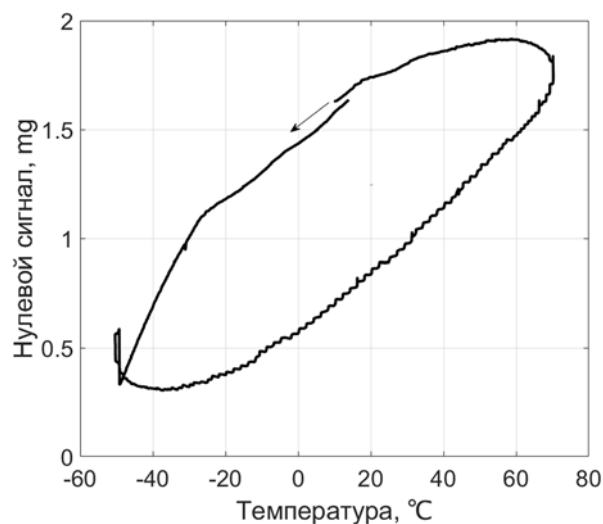


Рис.4. Скачок нулевого сигнала при отрицательной температуре

Имеющиеся регулярно повторяющиеся скачкообразные изменения U_0 представляют особый интерес для исследования, так как в них проявляется многократное усиление влияние факторов, вызывающих нестабильность и неповторяемость параметров прибора. Отметим, что скачкообразные изменения нулевого сигнала U_0 и масштабного коэффициента SF обычно не выявляются при проведении статических температурных испытаний приборов.

II. Влияние погрешности изготовления упругого подвеса на температурное изменение U_0 . ПРОЦЕСС ФОРМООБРАЗОВАНИЯ(ТРАВЛЕНИЯ)

Одной из причин появления скачкообразного изменения U_0 при положительных температурах является искажение формы упругой перемычки. Искажения, такие как неплоскостность, шероховатость поверхности, выход балок из общей плоскости (параллельное смещение, поворот балок вокруг продольной оси) различаются по длине

и ширине балок и могут наблюдаться с помощью оптических методов. Результаты интерферометрических измерений форм балок показаны на рис. 5,6. Эксперименты показывают, что чем меньше отклонение формы балок от идеальной, тем с большей вероятностью можно получить малую и более стабильную величину U_0 . Следует иметь в виду, что наихудшие результаты по форме балок дают так называемые пицциновые технологии с индивидуальным изготовлением отдельных маятников (рис.5).

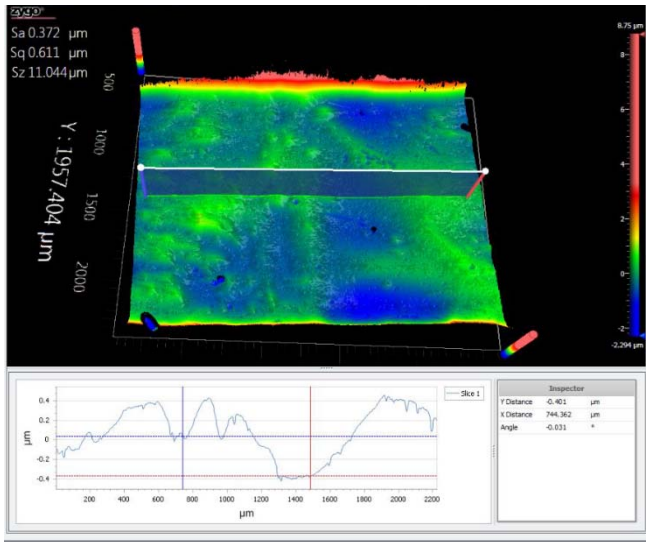


Рис. 5. Форма балки, полученной пицциновой технологией

Групповые MEMS технологии с использованием в качестве заготовок для изготовления маятников прецизионных пластин (вафель) из плавленного кварца (рис.7) позволяют получать хорошие результаты при наличии кварца высокой чистоты (99,999%) и организации оптимальной циркуляции травителя HF, равномерно омывающего все поверхности пластин, размещенных в кассете в реакторе.

Эти два фактора, наряду с выполнением на поверхности вафли специальных стойких к HF и не имеющих пор защитных масок, являются необходимым условием для получения качественных кварцевых маятников. Форма балок качественных балок соответствует рис.6.

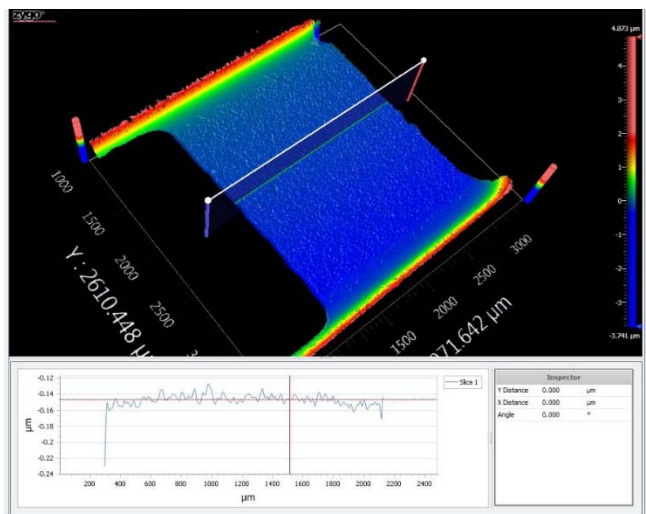


Рис. 6. Форма балки, полученной групповой MEMS технологией



Рис. 7. Маятники, изготовленные групповой MEMS технологией

III. ПРОЦЕСС НАПЫЛЕНИЯ ТОКОПРОВОДЯЩИХ ПЛЕНОК

В традиционных конструкциях акселерометров типа Q-flex [2] электропроводящие покрытия маятника (контактные площадки, проводники на рамке, покрытие на поверхности установочных платиков, электроды на поверхности лопасти маятника и токоподводы на упругих балках) выполняются путем напыления на поверхность маятника подслоя хрома или титана толщиной 400-600 ангстрем, поверх которого напыляется золото. Толщина золотого покрытия варьируется от 2000 ангстрем на поверхности упругих балок подвеса до 6000 ангстрем для электродов и контактных площадок. Несмотря на столь малую толщину напыления металлических пленок, ими создаются заметные деформации элементов кварцевого маятника из-за большой разницы ТКЛР плавленного кварца и золота ($0,5 \times 10^{-6}$ 1/K и 14×10^{-6} 1/K соответственно).

Особенность процесса напыления металлической пленки состоит в том, что при напылении поверхность кварцевого маятника нагревается от начальной температуры в $+20$ °C до температуры порядка $(+60..+100)$ °C в зависимости от толщины напыления. После этого кварцевая деталь и напыленный металл остывают до комнатной температуры. При этом металл сильно выгибает поверхность балки. Если затем проводить напыление на противоположную сторону маятника, то его деформированная форма сохранится даже при одинаковой толщине напыления (при напылении на лицевую сторону маятника изначально холодная поверхность балок была плоской, а при напылении на обратную сторону изначально холодная поверхность балок кривая). В связи с этим необходимо одновременно напылять металл сразу на обе стороны балки, т.е. использовать два одинаковых магнетрона или вращать вафлю в потоке напыляемого металла вокруг ее экваториальной оси.

Помимо этого, к термодформации кварцевого маятника при эксплуатации прибора может приводить технологическая погрешность формирования металлизации (до 10% толщины напыления и до 50 мкм разброс топологии) токоподводов. На рис. 8а представлен результат моделирования деформации перемычки упругого подвеса с разнотолщинностью металла с лицевой и обратной стороны 10% (2000 и 2200 ангстрем соответственно). На рис. 8б представлен результат моделирования деформации пере-

мычки упругого подвеса при погрешности ширины токоподводов с лицевой и обратной стороны (0,9 мм и 0,95 мм соответственно) при температуре -55°C .

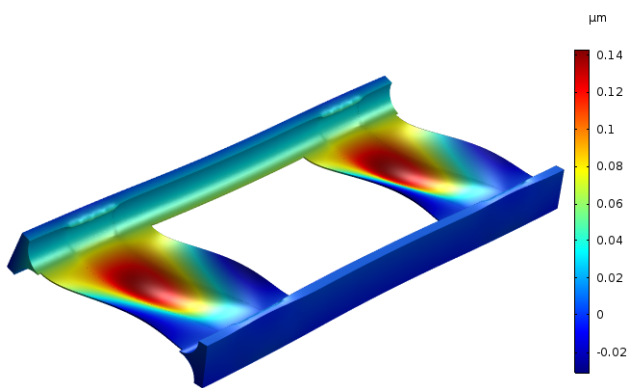


Рис. 8а. Вид термдеформаций упругого подвеса кварцевого маятника при разнотолщинности напылённых токоподводов при температуре минус 55°C , коэффициент отображённой деформации $\times 2000$.

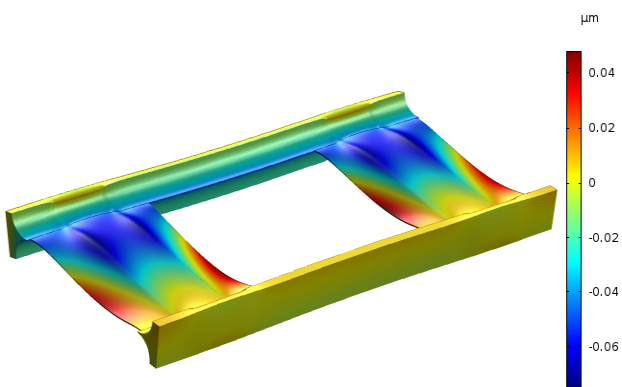


Рис. 8б. Вид термдеформаций упругого подвеса кварцевого маятника при погрешности ширины напылённых токоподводов при температуре минус 55°C , коэффициент отображённой деформации $\times 2000$.

Основной прогиб балка имеет в своей центральной части, а на участках, близких к ее заделке (рамка и лопасть) балка остается плоской. Таким образом углубление на балке имеет форму лодочки. При изменении температуры кривизна балки увеличивается или уменьшается, материал напыления и балки напряжен, и при некоторых температурах может происходить потеря устойчивости напряженного состояния, при котором форма изгиба балки может скачкообразно измениться на противоположную. В результате происходит изменение нулевого сигнала. Данное явление проявляющееся в виде повторяющихся скачков при каждом циклическом изменении температуры ранее было рассмотрено в работе [3]. Скачкообразные изменения имели место при охлаждении прибора от $+80^{\circ}\text{C}$ до $+50^{\circ}\text{C}$. Для случая погрешности ширины токоподводов на кварцевых перемычках появляются ярко выраженные рёбра жёсткости.

Помимо деформаций, описанные погрешности металлизации приводят также к возникновению уводящего момента при изменении температуры. Согласно проведённым расчётам, уровень напряжений в золотых токоподводах в диапазоне температур от минус 55 до $+95^{\circ}\text{C}$ может превышать предел упругости золота, что приводит к пластическим деформациям. Для исследования этого эф-

фекта проведено моделирование нулевого сигнала акселерометра в зависимости от температуры для различных типов погрешностей металлизации с учётом пластических деформаций золота (рис. 9).

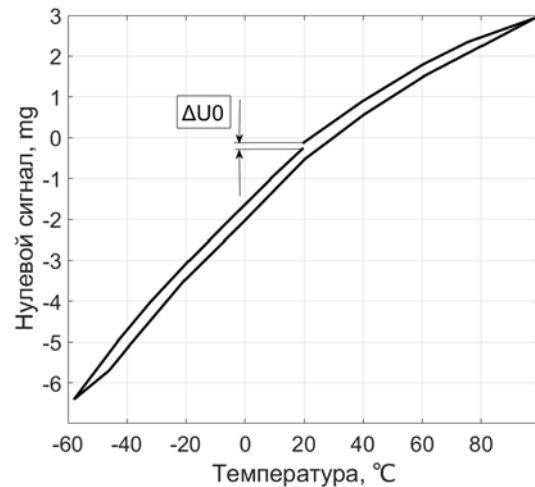


Рис. 9. Моделирование зависимости нулевого сигнала акселерометра от температуры в случае разнотолщинности токоподводов 10%

Моделирование имитирует данные статического температурного испытания, так как не учитывает динамические тепловые процессы. Получено, что погрешность толщины проводников 10% между лицевой и обратной стороной приводят к смещению нулевого сигнала до $100 \text{ мкг}/^{\circ}\text{C}$, гистерезис достигает 200 мкг , а невозврат после одного термоцикла превышает 20 мкг . Для погрешности ширины токоподводов 50 мкм между лицевой и обратной стороной значения смещения, гистерезиса и невозврата нулевого сигнала составили $75 \text{ мкг}/^{\circ}\text{C}$, 160 мкг и 17 мкг соответственно. Помимо традиционной конструкции, моделировался модифицированный вариант маятника с токоподводами, расположенными в нейтральном слое упругих перемычек в специально сформированных канавках [3]. Для такой конструкции при разнотолщинности металла в 10% значение смещения нулевого сигнала оказалось равным около $7 \text{ мкг}/^{\circ}\text{C}$, а гистерезис и невозврат не превышали 30 мкг и 6 мкг соответственно.

Влияние напыления металла на поверхность маятника может быть существенно снижено в случае использования в акселерометре свободно висящих токоподводов, размещенных в окне между упругими перемычками (рис.10).[4].

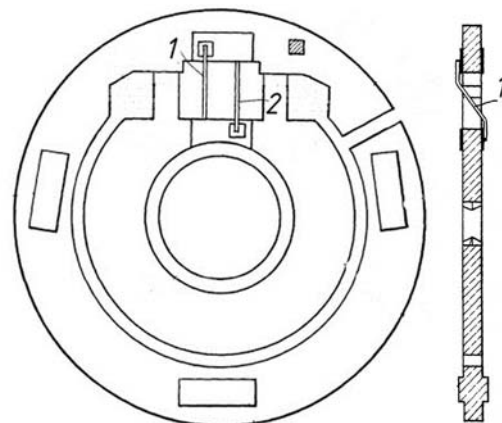


Рис. 10. Вид маятника с приваренными свободновисящими токоподводами

Здесь на поверхности рамки и лопасти напылены контактные площадки, к ним приварены гибкие токоподводы 1, 2 из золотой фольги толщиной 3 мкм. Такой токоподвод идеален с точки зрения влияния на нестабильность нулевого сигнала, однако его изготовление требует высокой квалификации сборщика и не вписывается в изготовление маятников по MEMS технологии.

Была разработана конструкция и MEMS технология, позволяющая получить маятники с гибкими свободными токоподводами, размещенными в окне между упругими балками[5]. Данная технология использует удаляемый после напыления токоподводов жертвенный слой кварца с поверхностью на которую напыляется материал токоподводов, совпадающей с нейтральной плоскостью упругих балок. Вид маятника со свободными токоподводами показан на рис. 11.



Рис.11. Эскизный вариант кварцевого маятника со свободновисящими токоподводами, выполненный по технологии MEMS

К сожалению, при использовании описанной технологии свободные токоподводы из-за разности ТКЛР кварца и золота после изготовления оказываются сильно натянутыми, вплоть до развития пластических деформаций. Данные напряжения могут влиять на упругий момент балок, возникающий при отклонении лопасти маятника. По этой причине была разработана MEMS технология изготовления гофрированных токоподводов, в которых влияние разности ТКЛР существенно снижено. Согласно моделированию (рис.12), в таком варианте конструкции при погрешности толщины токоподводов 10% смещение нулевого сигнала не превышает 1,7 мкг/°С, а гистерезис и невозврат имеют значения 7 мкг и 1 мкг соответственно.

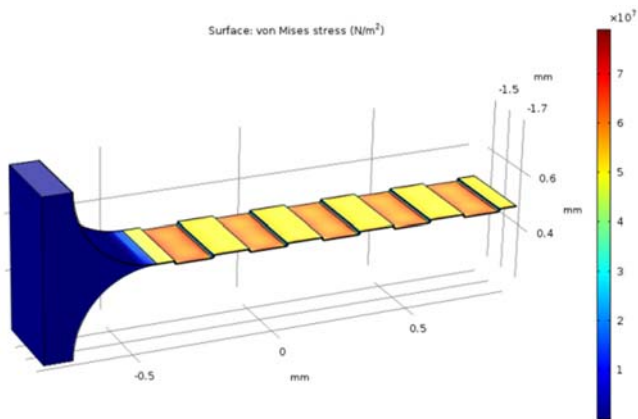


Рис. 12. Результат моделирования гофрированного токоподвода

IV. ВЛИЯНИЕ ТЕРМОУПРУГИХ СТРУКТУРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ В СУПЕРИНВАРНЫХ СПЛАВАХ, ИЗ КОТОРЫХ ИЗГОТОВЛИВАЮТСЯ ДЕТАЛИ Q-FLEX АКСЕЛЕРОМЕТРОВ

При проведении динамических температурных испытаний акселерометров типа Q-flex с магнитопроводами из суперинварных сплавов в некоторых приборах были зафиксированы скачкообразные изменения нулевого сигнала при охлаждении в области от минус 25°С до минус 55°С. В партии приборов, демонстрирующих при испытаниях данное явление, магнитопроводы были изготовлены из суперинвара одной плавки. В приборах, для производстве которой применялся тот же суперинвар, но взятый из другой плавки, скачкообразные изменения сигнала зафиксированы не были. Т.е. наличие скачкообразного сигнала у выборки приборов, зависело от того, из какой плавки взяты заготовки для магнитопровода. График изменения нулевого сигнала в зависимости от температуры и его скачкообразное изменение показаны на рис. 13.

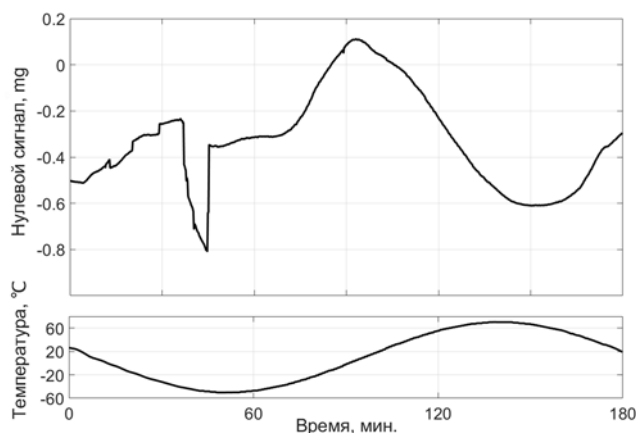


Рис.13. График изменения нулевого сигнала в зависимости от температуры и его скачкообразное изменение

Причиной появления скачков нулевого сигнала акселерометра при охлаждении является резкая деформация или изменение объема малых, по отношению к размерам магнитопровода, областей материала в толще или на поверхности магнитопровода, приводящее к нарушению плоскостности сопрягаемой с маятником поверхности. Подобная деформация может происходить при фазовом превращении в сплаве, т.е. при переходе части материала из аустенитной фазы в мартенситную. При этом лишь ограниченное число зерен материала магнитопровода претерпевает мартенситное превращение, основной же объем сохраняет аустенитную структуру. В качестве примера показана аустенитная и мартенситная структуры стали (рис.14а и рис.14б соответственно).[6] Инварные свойства сплава железа и никеля обеспечивает аустенитная структура (ТКЛР от $0,1 \cdot 10^{-6}$ 1/К до $1,7 \cdot 10^{-6}$ 1/К при температурах от минус 60 °С до +100 °С). При переходе части материала в мартенситную фазу, которая имеет ТКЛР в районе $10 \cdot 10^{-6}$ 1/К, инварные свойства сплава в этой области теряются. Мартенситное превращение может иметь взрывной характер и может быть первопричиной скачков сигнала.



Рис. 14а. Аустенитная структура



Рис. 14б. Мартенситная структура

Известно, что на точку мартенситного преобразования существенно влияет содержания никеля, а сплавы инварного класса склонны к ликвации никеля к границам структурных элементов (ячеек, дендритов). Согласно данным исследований [7] разность содержаний никеля на границе и в центре структурных элементов сплавов в условиях охлаждения отливок может достигать 5% по массе. В обедненных никелем центральных частях ячеек и дендритов могут появиться зоны, в которых при минусовых температурах выделяется мартенсит.

В материалах типа Super Invar 32-5 производитель Carpenter Technology Corporation гарантирует отсутствие мартенситных превращений в сплаве при отрицательных температурах вплоть до минус 75 °С. В связи с этим целесообразно сравнить химический состав сплава Super Invar 32-5 и сплава 32НКД, из которого изготовлены магнитопроводы акселерометров, имеющих скачки нулевого сигнала при термоциклировании (табл.1) [8, 9]. В сплаве 32НКД имеется повышенное содержание меди и углерода в сравнении со сплавом Super Invar 32-5.

ТАБЛИЦА 1. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ СПЛАВОВ

Сплав	Массовая доля элементов, %						
	Fe	Ni	Co	C	Mn	Cu	Si
32НКД	Основа	31,5-33,0	3,3-4,2	0,05	0,4	0,6-0,8	0,2
Super Invar 32-5	Основа	32,62	5,12	0,01	0,49	0,06	0,1

Содержание углерода и меди влияет на температуру прямого и обратного мартенситного превращения в сплаве. Повышенное процентное содержание меди и углерода естественным образом увеличивает разность содержания по массе данных элементов как в заготовках разных плавок, так и внутри отдельно взятой заготовки магнитопровода. Данный факт, в совокупности с ликвацией никеля, может приводить к тому, что мартенситное преобразование имеет место быть только в отдельно взятых магнитопроводах, и лишь ограниченное число зерен в сплаве его претерпевают.

Возможность мартенситного преобразования в суперинварных сплавах при температурах, лежащих в рассматриваемом диапазоне, также рассмотрена в статье [10]. Мартенситная структура образовывалась, по представленным данным, при температурах около минус 30 °С и после трех циклов охлаждения полностью стабилизировалась. При этом обратного перехода в аустенитную фазу при термоциклировании не происходило.

При испытаниях отдельных партий приборов типа Q-flex скачки нулевого сигнала повторялись с неизменной амплитудой и после 20-ти температурных циклов, что говорит об обратимости фазового превращения в исследуемом суперинварном сплаве. Т.е. имеет место быть термоупругое мартенситное превращение. График повторяющихся скачков нулевого сигнала представлен на рис. 15.

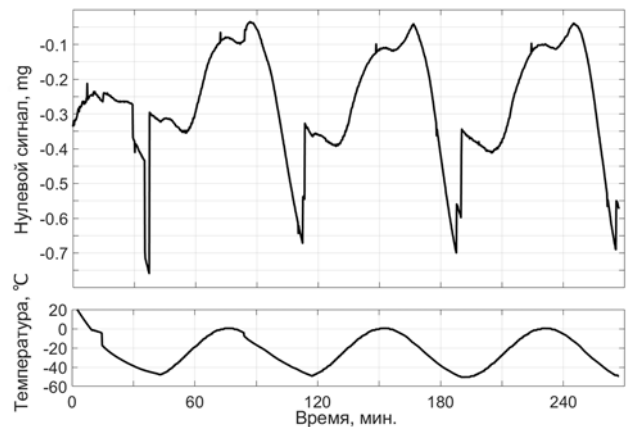


Рис.15. График повторяющихся скачков нулевого сигнала

Термоупругое мартенситное превращение характеризуется малым температурным гистерезисом (десятки градусов Цельсия) т.е. разницей температур точек прямого и обратного преобразования. На данном эффекте базируются сплавы с эффектом памяти формы. Эффект памяти формы открыт у многих сплавов, в том числе у систем на базе Fe-Ni-Co. Но для суперинваров термоупругое мартенситное преобразование в литературе не описано, т.к. оно может носить вероятностный характер, зависящий от случайной вариации содержания элементов в сплаве или от их ликвации по объему заготовки.

Для подтверждения наличия обратного мартенситного преобразования и обнаружения примерной температуры, при которой оно происходит, в рамках испытаний приборов был проведен ряд термоциклов с последовательным уменьшением верхней температуры. В термоциклах с диапазоном минус 50 °С - минус 20 °С повторяемость скачков нулевого сигнала исчезла. Следовательно,

можно сделать вывод о том, что обратного перехода в аустенитную фазу до минус 20°C не происходит, мартенсит, образовавшийся при минусовой температуре, стабилизируется. Соответствующий график представлен на рис. 16.

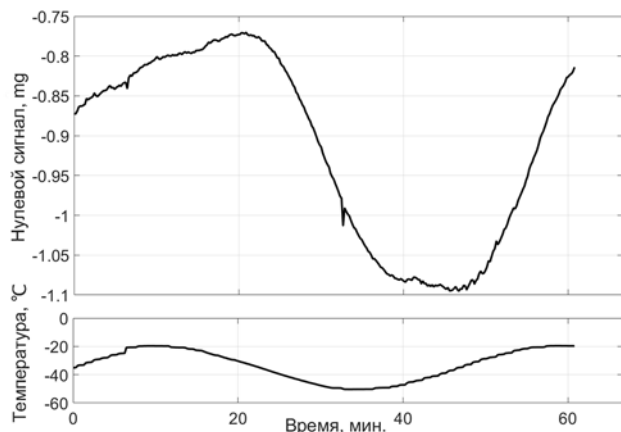


Рис.16. Отсутствие скачка нулевого сигнала

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье показаны причины возникновения скачкообразных изменений нулевого сигнала, которые имеют место быть как при положительных, так и при отрицательных температурах.

Рассмотрены конструкции Q-flex акселерометров с напыленными и свободными токоподводами.

Отмечены особенности технологий напыления металла и требования к кварцевым заготовкам, обеспечивающие высокую стабильность и воспроизводимость нулевого сигнала акселерометров.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Honeywell, Q-flex QA-3000 Accelerometer, EXP029 datasheet, May, 2006.
- [2] Пат. 4399700 США, МПК G01P 15/13. Force transducer flexure with conductors on surfaces in the neutral bending plane / Richard A. Hanson.; приор. 14.07.1981; заявитель и патентообладатель Sandstrand Data Control, Inc. ; опубл. 23.08.1983.
- [3] Сео Дже Бом. Оптимизация параметров и моделирование рабочих режимов в компенсационных акселерометрах типа Q-flex и Si-flex : дис. ... канд. техн. наук: Моск. гос. техн. ун-т им. Н.Э. Баумана.- Москва, 2012. 154 с.
- [4] Пат. 6422076 США, МПК G01P 15/132. Compensation pendulous accelerometer / Prokofiev V.M., Larshin A.S., Kurnosov V.I., и др.; приор. 21.06.2000; заявитель и патентообладатель; опубл. 23.07.2002.
- [5] Заявка на пат. 2019107343 Российская Федерация, МПК G01P 15/13. Маятниковый компенсационный акселерометр / Коновалов С.Ф., Майоров Д.В., Пономарёв Ю.А. и др.; приор. 15.03.2019; заявитель и патентообладатель Коновалов С.Ф.
- [6] H.K.D.H. Bhadeshia, Martensite and Martensitic Phase Transformations, 2002.[Сайт]. URL: <http://www.phase-trans.msm.cam.ac.uk/2002/martensite.html>. [Дата обращения: 10.04.2020].
- [7] Рабинович С. В., Харчук М. Д., Черменский В. И. О влиянии микроликвации никеля на тепловое расширение литейных железоникелевых сплавов // Изв.вузов. Черная металлургия. 1994. № 10. С.29–32.
- [8] Carpenter Technology Corporation, Super Invar 32-5, UNS K93500 datasheet, March, 2004.
- [9] ГОСТ 10994-74 Сплавы прецизионные. Марки
- [10] Distl Josef, Juranek Hans Joachim, Luichtel Georg. Expansion behaviour of Superinvar in the vicinity of martensite transformation temperature // Steel Research. 2002. вып.72. с. 416–420.