

УДК: 528.526.6
EDN EXPHRX

Б. С. ЛУНИН, М. А. БАСАРАБ, Р. А. ЗАХАРЯН

РАССЕЯНИЕ ЭНЕРГИИ КОЛЕБАНИЙ ПОЛУСФЕРИЧЕСКОГО РЕЗОНАТОРА В ОБЛАСТИ КРЕПЛЕНИЯ

Дефект массы полусферического резонатора вызывает появление сил и моментов, действующих на его центр масс и приводящих к колебаниям резонаторной ножки. Часть энергии этих колебаний рассеивается в области крепления резонатора, что уменьшает его добротность и создает дополнительный систематический дрейф. В статье рассмотрены основные факторы, определяющие диссипативные характеристики соединения «резонатор–основание», в том числе конструкция и размеры резонатора, внутреннее трение в соединительном слое, а также дефекты этого слоя. Показано, что вызванное закреплением внутреннее трение пропорционально толщине соединительного слоя и обратно пропорционально толщине основания, диаметру ножки и модулю упругости материала соединительного слоя. Несимметричное закрепление ножки в отверстии основания, овальность этого отверстия или ножки, наличие пузырей в соединительном слое приводят к азимутальной зависимости потерь и дополнительному систематическому дрейфу волнового твердотельного гироскопа.

Ключевые слова: полусферический резонатор, диссипация, волновой твердотельный гироскоп.

Введение

Волновые твердотельные гироскопы (ВТГ) представляют собой большой класс современных навигационных приборов. Они применяются в различных областях техники, однако их широкое распространение сдерживается техническими и экономическими причинами. Одна из них связана с необходимостью изготовления кварцевого полусферического резонатора с высокой осевой симметрией и добротностью. Разного рода геометрические отклонения формируют дефект массы резонатора, который может существенно ухудшить его характеристики. Геометрические отклонения формы резонатора со средним радиусом R в общем случае произвольно распределены по поверхности полусферы. Для выбранного сечения оболочки толщина ее стенки может быть описана рядом Фурье:

$$h(\varphi) = h_0 + \sum_{k=1}^{\infty} h_k \cos k(\varphi - \varphi_k). \quad (1)$$

Лунин Борис Сергеевич. Доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, МГУ имени М.В. Ломоносова (Москва). ORCID 0000-0001-8073-2559.

Басараб Михаил Алексеевич. Доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой информационной безопасности, МГТУ им. Н.Э. Баумана, НУК ИУ (Москва). ORCID 0000-0001-6492-1157.

Захарян Роберт Артушевич. Кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ВНИИ ГОЧС (ФЦ) (Москва). ORCID 0009-0008-1355-9790.

Неоднородность толщины стенки резонатора ведет к неравномерному по азимутальному углу φ распределению массы (на единицу угла) по такому же закону:

$$m(\varphi) = m_0 + \sum_{k=1}^{\infty} m_k \cos k(\varphi - \varphi_k), \quad (2)$$

где $m_k = \rho R^2 h_k$, а ρ – плотность материала резонатора.

Как было показано в ряде работ [1–5], наличие дефекта массы резонатора приводит к возникновению сил и моментов, действующих на его центр масс, которые прямо пропорциональны величинам 1-й, 2-й и 3-й форм этого дефекта. Для полусферического резонатора, работающего на нижней изгибной моде колебаний, 1-я и 3-я формы дефекта массы, пропорциональные величинам m_1 , m_3 , вызывают поперечные (относительно оси симметрии) силы, а пропорциональная величине m_2 2-я форма – продольную силу. Неравномерное распределение массы по высоте полусферического резонатора вызывает также и моменты сил, которые приводят к колебаниям ножки резонатора, причем большая часть энергии этих колебаний рассеивается в клеевом (или паяном) соединительном слое, соединяющем ножку резонатора с основанием. Если рассеяние энергии в этом соединении неоднородно и обусловлено вектором колебаний центра масс, то и добротность резонатора будет зависеть от ориентации волновой картины, что сопровождается возникновением систематического дрейфа волновой картины со скоростью [6]

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{\pi f \sin 4(\theta - \varphi_0)}{4} (\tilde{\xi}_1 - \tilde{\xi}_2) = \frac{\pi f \sin(\theta - \varphi_0)}{4} \left(\frac{1}{Q_1} - \frac{1}{Q_2} \right), \quad (3)$$

где θ – текущее угловое положение (ориентация пучностей) волновой картины; $\tilde{\xi}_1$ и $\tilde{\xi}_2$ – максимальное и минимальное внутреннее трение в закрепленном резонаторе; Q_1 и Q_2 – минимальная и максимальная добротность закрепленного резонатора; φ_0 – угол ориентации диссипативного дефекта оболочки; f – частота колебаний резонатора.

Амплитуда скорости этого дрейфа волновой картины может достигать нескольких десятков или даже сотен градусов в час, а его стабильность зависит от постоянства (как правило, невысокого) внутреннего трения в соединении «резонатор–основание». Любая нестабильность диссипативных процессов в этом соединении влечет за собой нестабильность амплитуды скорости дрейфа (3), что воспринимается навигационной системой как случайная погрешность. По существу, именно массовый дисбаланс и рассеяние энергии колебаний в области крепления резонатора являются основной причиной погрешности ВТГ.

В настоящей работе рассмотрены основные факторы, влияющие на диссипативные характеристики соединения «резонатор–основание», такие как конструкция и размеры резонатора, внутреннее трение в соединительном слое, а также дефекты этого слоя.

Конструкция резонатора и диссипация в соединительном слое

В описанных в литературе серийно производимых ВТГ полусферический резонатор крепится к основанию обычно с помощью клея или припоя. Обычно используют малогазящие клеи различных типов [7], а при пайке – индий, обладающий хорошей адгезией к кварцевому стеклу и невысокой температурой плавления (152°C). В 1990-х гг. фирма

Delco Electronics применяла стеклоприпой (фритт) для сборки прибора, однако затем отказалась от этой технологии ввиду ее сложности и ненадежности. Предлагались также способы бесклеевого соединения основания с резонатором как с одной крепежной ножкой [8], так и с двумя [9]. При этом резонатор фиксировался с помощью упругих элементов, уменьшающих рассеяние энергии колебаний в основании. Такое закрепление действительно уменьшает потери энергии колебаний в опоре, но одновременно ухудшает диссипативную стабильность соединения. Механический контакт упругого элемента с кварцевой поверхностью имеет место только в отдельных ее областях (пятнах контакта). Под воздействием ударов, вибрации, температуры, приводящих к неравномерному расширению деталей и скольжению, условия контакта и поверхностное внутреннее трение в пятне изменяются, при этом одновременно изменяются и параметры систематического дрейфа стоячей волны. Ввиду этого механические способы крепления резонатора практического применения в ВТГ не нашли, несмотря на их очевидные достоинства (отсутствие газовыделения, разборность). В связи с этим далее рассматриваются главным образом соединительные слои клея и припоя.

Проанализируем, как влияет конструкция полусферического резонатора на рассеяние энергии в соединительном слое. В литературе описаны резонаторы ВТГ различных конструкций, в самом общем виде их можно разделить на резонаторы с двухсторонней ножкой (использовались в 1970–2000 гг. в ВТГ фирмой Delco/Litton) и с односторонней внутренней ножкой, применяемые в большинстве современных ВТГ (выпускаемых, например, фирмой Sagem). На рис. 1, а показано соединение основания ВТГ с полусферическим резонатором с односторонней внутренней ножкой. Для простоты приведен только дефект 1-й формы величиной m_1 , расположенный на некотором расстоянии от кромки, которое соответствует полярному углу α .

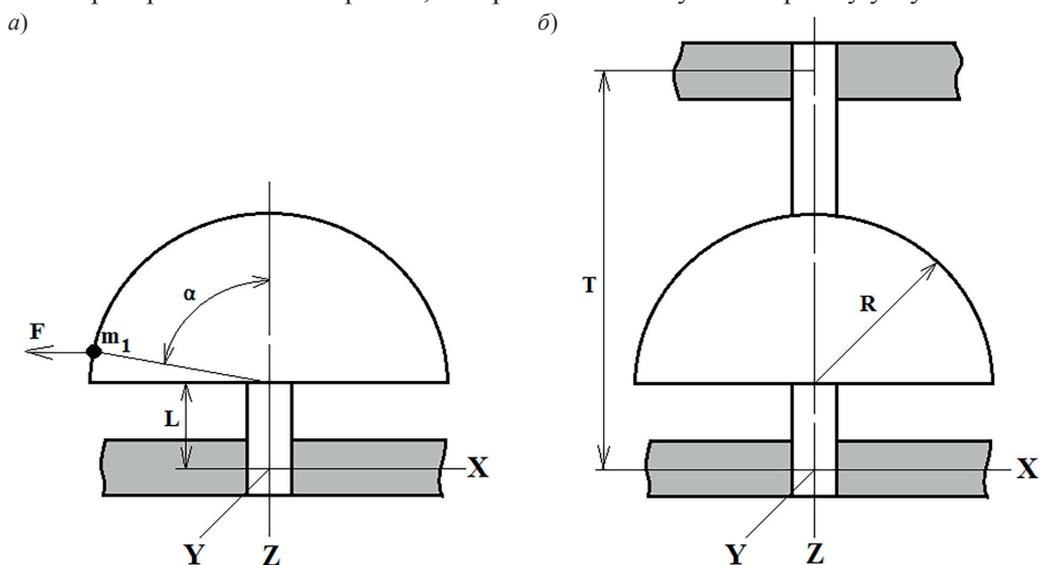


Рис. 1. Закрепление несбалансированного полусферического резонатора: а) с внутренней крепежной ножкой; б) с двухсторонней ножкой

В результате колебаний оболочки резонатора этот дефект массы формирует поперечную силу F , момент силы, связанный с креплением резонатора вне центра масс,

приближенно равный $M_{11} = F \cdot L$, и момент силы, связанный с вертикальным движением кромки оболочки, $M_{12} = F \cdot R$. Приложение этих сил и моментов сил к соединительному слою вызывает его деформацию и сопровождается рассеянием энергии колебаний, то есть ведет к уменьшению добротности резонатора.

При действии поперечной силы F движение резонатора относительно основания вдоль оси X , т.е. перпендикулярно ножке, можно описать уравнением

$$\ddot{x} + \xi\omega\dot{x} + \frac{SE}{d_c M} x = \frac{F}{M} \cos\omega t, \quad (4)$$

где M – масса резонатора; F – поперечная сила, созданная дефектами массы; ξ – внутреннее трение в соединительном слое; d_c – толщина соединительного слоя; S – деформируемая площадь соединительного слоя; E – модуль упругости материала слоя; ω – круговая частота колебаний.

В установившемся режиме амплитуда колебаний ножки равна

$$x_0 = \frac{F}{M \sqrt{\left(\frac{SE}{d_c M} - \omega^2\right)^2 + \xi^2 \omega^4}}. \quad (5)$$

Так как в большинстве случаев $\xi^2 \omega^4 \ll \left(\frac{SE}{d_c M} - \omega^2\right)^2$, то $x_0 \approx \frac{F d_c}{SE}$.

Энергия деформации соединительного слоя равна

$$W_c = \frac{F^2 d_c}{2SE}. \quad (6)$$

Часть этой энергии ΔW , необратимо рассеиваемая в соединительном слое, определяется произведением внутреннего трения в клее или припое ξ и энергии деформации этого слоя:

$$\Delta W = 2\pi\xi W_c. \quad (7)$$

Вносимое в осциллятор дополнительное внутреннее трение равно

$$\tilde{\xi} = \frac{\xi W_c}{W},$$

где W – энергия колебаний резонатора.

Согласно формуле Релея [6],

$$W = \frac{1,52961\pi R^2 h_0 \rho a^2 \omega^2}{8}, \quad (8)$$

где a – амплитуда колебаний резонатора.

Полагая для 1-й формы дефекта массы $\alpha = \pi/2$ и $F \cong m_1 a \omega^2$, получаем

$$\tilde{\xi} = \frac{4\xi d_c m_1^2 \omega^2}{1,52961 SE \pi R^2 h_0 \rho}. \quad (9)$$

Это дополнительное внутреннее трение входит в виде слагаемого в общее внутреннее трение в резонаторе. Очевидно, что если резонатор сбалансирован, т.е. $m_1 = 0$,

то и $\tilde{\xi} = 0$. В несбалансированном резонаторе в том случае, если деформирующая соединительный слой сила не зависит от ориентации волновой картины (это может быть, например, при наличии только 1-й или только 3-й форм дефекта массы), $\tilde{\xi} = \text{const}$. Тогда внутреннее трение вдоль собственных диссипативных осей резонатора увеличится на одну и ту же величину $\tilde{\xi}$. Добротность резонатора уменьшится, но разность $(\tilde{\xi}_1 - \tilde{\xi}_2)$, входящая в виде множителя в (3), останется неизменной, т.е. скорость систематического дрейфа стоячей волны не изменится. Наличие 2-й формы дефекта массы, а также комбинация 1-й и 3-й форм приводят к зависимости силы F от ориентации волновой картины, при этом и величина $\tilde{\xi}$ будет функцией окружного угла φ , что вызывает изменение разности $(\tilde{\xi}_1 - \tilde{\xi}_2)$ и, соответственно, скорости систематического дрейфа.

Формула (9) позволяет сделать несколько полезных выводов. Прежде всего, обусловленное закреплением дополнительное внутреннее трение квадратично зависит от величины дефекта массы, поэтому уменьшение величины дефектов массы первых трех форм очень эффективно для повышения точности ВТГ. Это может быть достигнуто как увеличением точности изготовления резонатора, так и его последующей балансировкой.

Согласно (9), дополнительные потери в резонаторе пропорциональны толщине соединительного слоя, поэтому толщина этого слоя должна быть минимальной, а его материал (клей или припой) – обладать высоким значением модуля упругости. Так как эти потери обратно пропорциональны площади S , то увеличение диаметра ножки резонатора и толщины основания также будут уменьшать эти потери.

Отметим, что формально приведенные выше соотношения справедливы, например, и для бесклеевых механических соединений. При этом в качестве площади S следует учитывать площадь пятен контакта, а d_c и E соответствуют толщине нарушенного поверхностного слоя и его модулю упругости. Так как эти параметры можно оценить лишь очень приближенно, практического смысла в расчетах, подобных приведенным, для таких соединений нет.

На зависимость характеристик резонатора от дефекта массы оказывают влияние и его размеры. С экономической точки зрения наиболее выгодно производить резонаторы меньших размеров (главным образом меньшего диаметра), что позволяет уменьшить размеры ВТГ в целом и тем самым дать ему конкурентные преимущества. Так, если диаметр резонатора первых ВТГ был около 60 мм, то в настоящее время у промышленно выпускаемых ВТГ он составляет 20-30 мм и предпринимаются попытки дальнейшего его уменьшения. Рассмотрим проблемы, которые возникают при уменьшении диаметра резонатора, обладающего дефектом массы.

Если подставим выражение (2) в (9), то увидим, что величина $\tilde{\xi}$ не зависит от радиуса резонатора R . Тем не менее изменение геометрии резонатора влечет за собой и изменение частоты его колебаний согласно формуле Рэлея [6]:

$$f = \frac{2,62h_0}{2\pi R^2} \sqrt{\frac{E_m}{3\rho(1+\nu)}}, \quad (10)$$

где E_m – модуль упругости; ν – коэффициент Пуассона материала резонатора.

Стремление сохранить резонансную частоту на уровне единиц кГц требует разработчиков одновременно с уменьшением диаметра резонатора уменьшать и толщину его стенки. Анализ известных конструкций ВТГ [10] показывает,

что в большинстве случаев толщина стенки составляет 6-7% от его радиуса. Полагая $h_0 = 0,065R$ и подставляя в (9) выражения (2) и (10), получаем $\tilde{\xi} \sim 1/R^3$. Хорошо известно, что полусферические резонаторы промышленно выпускаемых ВТГ изготавливаются из кварцевого стекла на специальных станках, точность которых ограничена [11]. При использовании одного и того же оборудования амплитуды гармоник отклонения геометрии резонатора h_k от осесимметричной формы будут примерно одинаковы независимо от диаметра резонатора. В результате влияние дефекта массы на скорость систематического дрейфа будет быстро возрастать при уменьшении диаметра резонатора.

Определенное значение имеет и профиль стенки резонатора. Резонатор можно считать абсолютно жестким телом, если его собственные частоты превышают частоту рабочей моды колебаний. Спектр собственных частот резонатора зависит не только от диаметра оболочки и ее толщины, но и от диаметра ножки, радиуса перехода «оболочка–ножка», расстояния между центрами внешней и внутренней полусфер. Если частота колебаний оболочки вокруг ножки оказывается меньше рабочей частоты колебаний, то маятниковые колебания оболочки передаются в опору через промежуточный осциллятор, и при определенных условиях передаваемая в опору сила значительно уменьшается. Так, если частота колебаний оболочки превышает собственную частоту промежуточного осциллятора в $N > \sqrt{2}$ раз и более, то сила колебаний, передаваемых в опору, ослабляется в N^2 раз [12]. Другими словами, промежуточный осциллятор выполняет роль виброразвязки между массиво неуравновешенной полусферической оболочкой и основанием прибора. Примером такого подхода является конструкция резонатора, предложенная фирмой Sagem, с переменным профилем стенки [13].

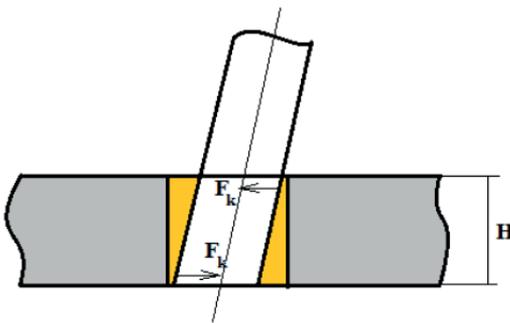


Рис. 2. Парирование моментов сил в месте крепления резонатора

Моменты сил также прикладываются в области соединения резонатора с основанием, они компенсируются моментом $F_k H/2$ (рис. 2), величина которого определяется как параметрами дефекта массы, так и толщиной основания, а также расстоянием L . Компенсирующий момент можно значительно уменьшить за счет уменьшения момента M_{11} путем приближения места закрепления резонатора к его центру масс (при этом $L \rightarrow 0$). Влияние момента сил M_{12} может

быть значимым, так как обычно $H < R$ и при небольшой толщине основания $F_k > F$.

Рассмотрим теперь диссипативные процессы, протекающие в соединениях при закреплении резонатора с двумя ножками (рис. 1, б).

При закреплении такого резонатора деформирующая сила распределяется приблизительно поровну между двумя опорами. Тогда с учетом квадратичной зависимости (6) общая энергия деформации соединительного слоя, связанная с дефектами массы, уменьшится примерно вдвое; соответствующим образом уменьшатся и общие потери энергии в закреплении. Отметим, что моменты сил в опорах при таком закреплении отсутствуют, так как они компенсируются сравнительно небольшими поперечными силами в двух опорах. Это обстоятельство позволяет пренебречь мо-

ментами сил, созданными дефектами массы, которые имеются на оболочке на различных углах α , и при балансировке резонатора ограничиться удалением неуравновешенной массы только с его кромки. Процедура балансировки резонатора при этом существенно упрощается, и, несмотря на технологическую сложность производства резонаторов с двухсторонней ножкой, эта конструкция обеспечивает более высокую точность прибора. Дело в том, что остаточный дисбаланс массы такого резонатора приводит к сравнительно небольшому рассеянию энергии колебаний в опорах и, соответственно, к меньшим разносторонности и амплитуде скорости систематического дрейфа волновой картины по сравнению с резонатором с одной внутренней крепежной ножкой.

Влияние неоднородностей соединительного слоя на диссипацию

Несимметричное закрепление. Предположим, что отверстие в основании диаметром D и сама ножка резонатора идеально круглые, но ножка закреплена несимметрично, т.е. толщина соединительного слоя с противоположных сторон ножки разная: с одной стороны $-(d_c + \delta)$, а с противоположной $-(d_c - \delta)$. При действии на резонаторную ножку переменной силы F соединительный слой с обеих сторон будет деформирован на одну и ту же величину Δh , но характер деформации будет разным: с одной стороны слой будет сжиматься, а с другой – растягиваться. При этом силы упругости, возникающие с противоположных сторон ножки из-за разной толщины соединительного слоя, будут неодинаковы.

Тогда

$$F = \frac{\Delta h SE}{d_c + \delta} + \frac{\Delta h SE}{d_c - \delta}. \quad (11)$$

Соответственно, будут разными и работы деформации соединительного слоя с противоположных сторон ножки.

Работа деформации соединительного слоя в этом случае равна:

$$W_c = \frac{\Delta h^2}{d_c} SE \left(1 - \frac{\delta^2}{d_c^2} \right)^{-1}. \quad (12)$$

Последний множитель в (12) учитывает несимметрию закрепления ножки. Например, при несимметрии $\delta/d_c = 10\%$ возникнет неоднородность потерь в закреплении, равная примерно 1%, что приведет к изменению скорости систематического дрейфа (3).

Овальность отверстия в основании. Предположим, что ножка резонатора идеально круглая, клеена в основание симметрично, но само отверстие в основании имеет овальность, в результате чего зазор изменяется от d_c (в направлении, например, оси X) до $(d_c + \delta)$ в направлении оси Y . При одной и той же силе F , создаваемой массовым дисбалансом резонатора, работы деформации соединительного слоя (и, соответственно, потери энергии колебаний вдоль этих направлений) будут различны. При этом

$$\frac{\Delta W_y}{\Delta W_x} = \frac{d_c + \delta}{d_c}. \quad (13)$$

Например, если зазор вдоль оси Y превышает зазор вдоль оси X на 10%, то и рассеиваемая энергия в направлении Y будет на 10% больше по сравнению с потерями в направлении X . Эта разница в потерях также ведет к возникновению дополнитель-

ного систематического дрейфа. Приведенный пример показывает, что овальность отверстия гораздо больше влияет на систематический дрейф ВТГ, чем несимметрия закрепления резонатора.

Наличие воздушных пузырей в соединительном слое. При соединении резонатора с основанием возможно образование воздушных пузырей в соединительном слое, что особенно характерно для клеевых соединений. Они также влияют на рассеяние энергии в соединении, так как локально изменяется площадь деформации материала слоя S . Рассмотрим идеальный случай, когда ножка и отверстие в основании совершенно круглые, ножка расположена в отверстии симметрично, но в соединительном слое есть воздушный пузырь площадью s . Согласно (6), при уменьшении площади S работа деформации соединительного слоя увеличивается. При помощи (6) можно показать, что работа деформации этого слоя увеличится в $S/(S-s)$ раз, что также приведет к изменению скорости систематического дрейфа.

Внутреннее трение в соединительном слое

В формулах (4), (5), (9) фигурирует величина внутреннего трения ξ , характеризующая ту часть энергии деформации соединительного слоя, которая необратимо переходит в тепло. Внутреннее трение определяется структурой материала, наличием примесей, разного рода дефектов и т.п. Существующие на сегодняшний день теоретические представления о природе внутреннего трения в клеях и металлах позволяют в целом понять причины их неупругости, однако теоретический расчет ξ затруднителен даже для материалов с простым составом и известной структурой. В связи с этим при расчете потерь в соединительном слое следует использовать экспериментальные данные. Внутреннее трение в металлах и сплавах исследуется на протяжении нескольких десятилетий, поэтому необходимые для расчетов данные могут быть взяты из литературы [14]. Опубликованной информации о внутреннем трении в клеях очень мало, и, учитывая широкую номенклатуру современных клеевых систем, ее приходится получать экспериментально.

Механические свойства клеев в достаточно широком температурном диапазоне определяются методом динамического термомеханического анализа (ДТМА): клеевой образец изготавливают в форме тонкой пластины, устанавливают на опоры и прикладывают динамическую нагрузку с помощью специального зонда. В результате образец совершает изгибные колебания с заданной частотой и амплитудой, которую выбирают так, чтобы деформация образца находилась в пределах нескольких мкм. Одновременно с нагружением образца переменной силой измеряют и его прогиб. Из-за внутреннего трения реакция образца запаздывает во времени, то есть имеет место фазовый сдвиг δ между приложенной силой и деформацией. Значения фазового сдвига вместе с амплитудами нагрузки и деформации используют для определения вязкоупругих свойств материалов – модуля Юнга и тангенса угла механических потерь, величина которого близка к ξ . Измерения обычно проводят в термокамере в диапазоне температур от -50 до $+250^\circ\text{C}$.

В качестве примера на рис. 3 приведены экспериментальные данные, полученные этим методом на термомеханическом анализаторе ТМА Q400 для двух клеев различных типов. На графике температурной зависимости внутреннего трения в клее К-400 (рис. 3, а) хорошо виден широкий пик внутреннего трения с максимумом

мом $\xi \approx 0,38$ при температуре $\sim 30^\circ\text{C}$, при этом область интенсивного внутреннего трения охватывает температурный диапазон от -40 до $+100^\circ\text{C}$. Эта температурная область с практической точки зрения является наиболее важной, но именно в ней внутреннее трение в швах, заполненных клеем К-400, будет приводить к наибольшим потерям энергии в резонаторе, что наиболее существенно влияет на работу ВТГ.

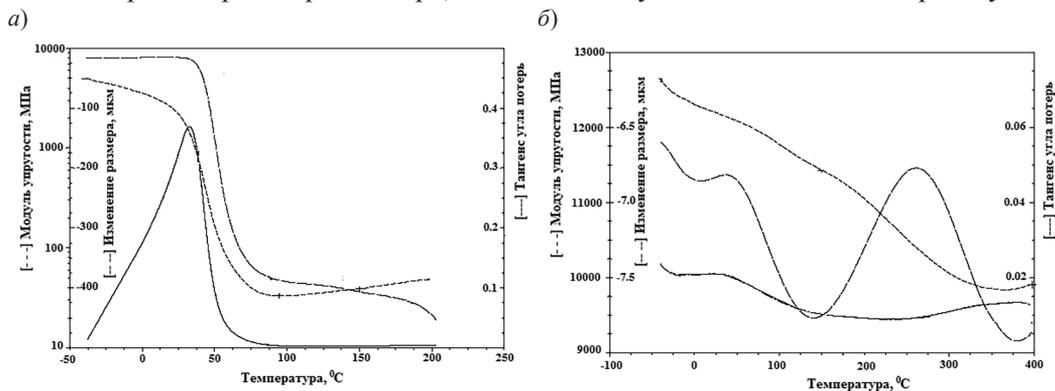


Рис. 3. Вязкоупругие свойства клеев К-400 (а) и Resbond-940LE (б), измеренные методом ДТМА

Следует обратить внимание и на очень сильное изменение модуля упругости отвержденного клея в этом температурном интервале: он уменьшается от ~ 5000 МПа при температуре -50°C до ~ 40 МПа при $+150^\circ\text{C}$, что свидетельствует о значительных изменениях в структуре клея. Все это в совокупности делает клей К-400 мало подходящим для сборки таких приборов, как ВТГ.

Совсем другую картину мы видим на рис. 3, б, где представлены результаты термомеханического анализа керамического клея Resbond 940LE. Уровень внутреннего трения в этом клее составляет $0,015-0,020$, то есть на порядок меньше, чем в К-400, причем сама зависимость не имеет резких экстремумов. Модуль упругости клея также уменьшается с ростом температуры, но это уменьшение в температурном диапазоне от 50 до $+150^\circ\text{C}$ не превышает 10% , что говорит о его гораздо более прочной и стабильной структуре.

По известной экспериментальной зависимости внутреннего трения в клее $\xi(T)$ с помощью приведенных формул можно определить внутреннее трение, вызванное закреплением несбалансированного резонатора, который имеет дефект массы для заданной температуры.

Заключение

Наличие в резонаторе дисбаланса массы приводит к вибрации ножки резонатора и рассеянию энергии в соединительном слое «резонатор–основание». Обусловленные соединительным слоем потери пропорциональны его толщине. По этой причине слой следует делать как можно тоньше, например за счет применения клея без наполнителя или с малым (несколько мкм) размером частиц наполнителя. Потери энергии также можно уменьшить путем утолщения основания и/или увеличения диаметра ножки резонатора.

При изготовлении разных по диаметру резонаторов на одном и том же оборудовании погрешность формы примерно одинакова. В этом случае интенсивность внутреннего трения в месте крепления несбалансированных резонаторов $\sim R^{-3}$.

Крепление полусферического резонатора за две ножки существенно уменьшает связанную с этим диссипацию, что в конечном счете улучшает характеристики ВТГ. Моменты сил, создаваемые при колебаниях дефектами массы, парируются сравнительно небольшими поперечными силами в опорах. Такое закрепление позволяет при балансировке резонатора удалять неуравновешенную массу только с кромки резонатора и упрощает процедуру его балансировки.

Несимметричное закрепление ножки в отверстии основания, овальность этого отверстия или ножки, наличие пузырей в соединительном слое приводят к азимутальной зависимости потерь и создают дополнительный систематический дрейф ВТГ.

Внутреннее трение в материале соединительного слоя является сложной функцией температуры, поэтому обусловленный этими потерями систематический дрейф также будет температурозависимым.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Жбанов Ю.К., Каленова Н.В.** Поверхностный дебаланс волнового твердотельного гироскопа // Известия. РАН. Механика твердого тела. 2001. №3. С. 11–18.
2. **Жбанов Ю.К., Журавлев В.Ф.** О балансировке волнового твердотельного гироскопа // Известия РАН. Механика твердого тела. 1998. №4. С. 4–16.
3. **Басараб М.А., Матвеев В.А., Лунин Б.С., Фетисов С.В.** Влияние неоднородности толщины оболочки волнового твердотельного гироскопа на параметры дебаланса // Гироскопия и навигация. 2016. №4. С. 14–24.
4. **Шарма Н. Г., Сундарараджан Т., Сингх Г. С.** Влияние геометрических дефектов на процессы диссипации энергии колебаний и характеристики резонатора твердотельного волнового гироскопа с высокой добротностью // Гироскопия и навигация. 2020. Т. 28. №3 (110). С. 18–31. DOI 10.17285/0869-7035.0037.
5. **Gerrard, D.D., Ng, E.J., Ahn, C.H., Hong, V.A., Kenny, T.W.,** Modeling the effect of anchor geometry on the quality factor of bulk mode resonators, *18th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS)*, Anchorage, AK, USA, 2015, pp. 1997–2000, doi 10.1109/TRANSDUCERS.2015.7181346.
6. **Журавлев В.Ф., Климов Д.М.** Волновой твердотельный гироскоп. М.: Наука, 1985. 125 с.
7. **Lunin, B.S., Kreisberg, V.A., Zakharyan, R.A., Basarab, M.A.,** Modelling of the residual atmosphere in vacuum device with internal adhesive joints, *Vacuum*, 2021, vol. 184, 109964, doi 10.1016/j.vacuum.2020.109964.
8. **Сапожников А.И., Виноградов И.Е., Доценко Е.С., Введенский М.Д., Тимофеев С.С., Колесник М.М., Измайлов Е.А., Молчанов А.В.** Волновой твердотельный гироскоп. Патент РФ RU 2793299 (2023).
9. **Измайлов Е.А., Колесник М.М., Усышкин О.Г., Кан С.Г., Измайлов А.Е.** Волновой твердотельный гироскоп. Патент РФ RU 2164006 (2001).
10. **Маслов А.А., Маслов Д.А., Ниналалов И.Г., Меркурьев И.В.** Волновые твердотельные гироскопы: обзор публикаций // Гироскопия и навигация. 2023. Т. 31. №1 (120). С. 3–25. EDN: BJLSLM.
11. **Ma, Z., Zhao, H., Zhao, W., Song, X., Chen, X.,** Precisions Forming Technology of Quartz Hemispherical Harmonic Oscillator, *Navigation and Control*, 2019, vol.18, no. 2, pp. 7795, doi 10.3969/j.issn.1674-5558.2019.02.012.
12. **Тимошенко С.П.** Колебания в инженерном деле. М.: Наука, 1967. 444 с.
13. **James, M., Jeanroy, A.,** Resonator particularly for a vibrating gyroscope, US Patent application 2006/0169068.
14. **Постников В.С.** Внутреннее трение в металлах. М.: Металлургия, 1968. 330 с.

Lunin B.S. (Lomonosov Moscow State University), **Basarab M.A.** (Bauman Moscow State Technical University), **Zakharya R.A.** (VNII GOCHS, Moscow)

Dissipation of Oscillation Energy of Hemispherical Resonator in Attachment Area, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2024, vol. 32, no. 2 (125), pp. 35–45.

Abstract. Mass unbalance of a hemispherical resonator creates forces and moments affecting its center of mass and causing the oscillations of the resonator stem. A part of oscillation energy is dissipated in vicinity of the resonator joint, which reduces its Q factor and leads to additional systematic drift. The paper considers the main factors determining the dissipative characteristics of the resonator-foundation joint such as the resonator design and structure, internal friction in the bonding layer, and the defects in this layer. It has been shown that the internal friction due to attachment is proportional to the layer thickness and inversely proportional to the thickness of foundation, stem diameter, and elasticity modulus of the layer material. Asymmetric stem fixation in the opening in the foundation, ovality of this opening or the stem, bubbles in the bonding layer result in azimuth-depending losses and additional HRG systematic drift.

Key words: hemispherical resonator, dissipation, hemispherical resonator gyroscope.

Материал поступил 26.03.2024