

НЕУПРУГИЕ ПРОЦЕССЫ ВО ВНУТРЕННИХ НЕРАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ МЕХАНИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРОВ ВОЛНОВЫХ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ГИРОСКОПОВ

Б.С. Лунин¹

luninboris@yandex.ru

М.А. Басараб²

basarab@bmstu.ru

¹ МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация

² МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрены диссипативные процессы, протекающие в типовых внутренних неразъемных (клеевых и паяных) соединениях волновых твердотельных гироскопов, реализуемых при сборке резонатора с основанием и установке пьезоэлементов на его поверхность. Часть энергии колебаний резонатора рассеивается за счет объемных и термоупругих процессов в материале соединительных слоев, что существенно ухудшает характеристики прибора. Этот эффект можно уменьшить путем балансировки резонатора, увеличения площади соединения, уменьшения толщины соединительного слоя и подбора материала слоя с малым объемным внутренним трением. Осевая асимметрия такого соединения приводит к зависимости вносимых потерь от окружного угла. В соединении пьезоэлемент-резонатор, кроме объемного внутреннего трения, следует учитывать возникающие при изгибных колебаниях термоупругие потери. Определено, что использование паяных соединений предпочтительнее по сравнению с клеевыми при толщине слоя менее ~ 20 мкм, тиксотропные свойства клеев приводят к гистерезису их неупругих свойств при нагреве и охлаждении, и, следовательно, к погрешностям волновых твердотельных гироскопов. Проанализировано влияние конфигурации внутренних неразъемных соединений и свойств материала соединительного слоя на рассеяние энергии колебаний

Ключевые слова

Резонатор, неразъемное соединение, неупругое поведение

Поступила 04.06.2025

Принята 04.07.2025

© Автор(ы), 2025

Введение. Среди современных навигационных приборов широкое применение получают волновые твердотельные гироскопы (ВТГ) различных типов. Благодаря точностным характеристикам, высокой надежности и небольшим размерам ВТГ используют в авиакосмической технике, оборудовании для бурения нефтяных и газовых скважин, судостроении, при этом их относительная себестоимость остается высокой. Чувствительным элементом таких приборов служит тонкостенный осесимметричный высокочастотный механический резонатор, изготовленный в виде полусферы или цилиндра с крепежной ножкой из кварцевого стекла или металла. Точность ВТГ находится в прямой зависимости от качества изготовления этого резонатора. Неизбежные в производстве разного рода отклонения от осесимметричной формы образуют массовый дефект, который может существенно ухудшить характеристики как механического резонатора, так и ВТГ в целом.

В точных ВТГ с полусферическими кварцевыми резонаторами основным источником погрешности следует считать отклонения геометрии резонатора от идеальной осесимметричной формы. Толщина стенки резонатора неодинакова как по окружному углу, так и по высоте полусферической оболочки. Задавая высоту сечения полусферы, можно представить азимутальную зависимость толщины стенки в виде ряда

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

где h_0 — толщина стенки резонатора; h_k — магнитуда k -й формы геометрического дефекта.

Гармонические слагаемые ряда (1) определяют величину неуравновешенной массы, распределенной по азимутальному углу φ (на единицу угла):

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

Здесь $m_k = \rho R^2 h_k$ (R — средний радиус полусферической оболочки резонатора; ρ — плотность материала резонатора).

В проведенных исследованиях [1–6] отмечено, что присутствие неуравновешенной массы ведет к формированию поперечных и продольных сил, а также моментов сил, приложенных к центру масс резонатора. Для нижней (естественной) формы колебаний оболочки резонатора значения формирующихся сил и моментов прямо пропорциональны магнитудам 1, 2

и 3-й формам ряда (2). Сформированные массовым дефектом резонатора силы и их моменты создают маятниковые колебания резонатора, и значительная часть энергии этих колебаний неупруго рассеивается в месте соединения резонатора с основанием. Это соединение обычно выполняют неразъемным (методом склеивания или пайки). Вследствие неоднородности зазоров между соединяемыми деталями и погрешностей в их взаимной ориентации при сборке энергия маятниковых колебаний резонатора рассеивается неоднородно по окружному углу, что влечет за собой и азимутальную зависимость добротности резонатора. В результате в резонаторе возникает угловой дрейф стоячей волны, скорость которого описывается выражением [6]:

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{\pi f \sin 4(\theta - \varphi_0)}{4} (\bar{\xi}_{\max} - \bar{\xi}_{\min}) = \frac{\pi f \sin 4(\theta - \varphi_0)}{4} \left(\frac{1}{Q_{\min}} - \frac{1}{Q_{\max}} \right), \quad (3)$$

где θ — ориентация стоячей волны в резонаторе; φ_0 — угол ориентации диссипативного дефекта в резонаторе; $\bar{\xi}_{\max}$ и $\bar{\xi}_{\min}$ — максимальное и минимальное внутреннее трение в резонаторе, установленном на основании; f — частота; Q_{\min} и Q_{\max} — минимальная и максимальная добротности резонатора.

Значение скорости углового дрейфа стоячей волны (3) может составлять сотни градусов в час, причем воспроизводимость значения определяется стабильностью интенсивности внутреннего трения в неразъемном соединении резонатора с основанием. Очевидно, что изменение внутреннего трения в этом соединении по любой причине (например, в силу температурной или временной деградации структуры материалов) ведет к изменению параметров дрейфа (3), формируя случайную погрешность ВТГ.

Рациональная конструкция соединения резонатор–основание позволяет уменьшить влияние массового дисбаланса резонатора и, следовательно, повысить точность прибора.

В ВТГ низкой и средней точности, в которых, как правило, используют недорогие металлические резонаторы, а в качестве датчиков и актюаторов широко применяют пьезоэлементы, установленные на поверхности механических резонаторов с помощью клея или припоя [7], к описанной выше погрешности добавляется погрешность, связанная с влиянием потерь в соединениях пьезоэлемент–подложка. Деформация слоя, соединяющего пьезоэлемент с поверхностью резонатора, также сопровождается неупругим рассеянием энергии колебаний и, соответственно, ведет к появлению дрейфа волновой картины, скорость которого описывается выражением [8]

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{\pi f \sin 4(\theta - \varphi_0)}{4} (\bar{\xi}_{\max} - \bar{\xi}_{\min} + k\xi_{c1} - k\xi_{c2}), \quad (4)$$

где k — коэффициент пропорциональности между энергиями деформации резонатора (W) и соединительного слоя (W_c) при колебаниях, т. е. $k = W_c/W$; ξ_{c1} , ξ_{c2} — внутреннее трение в соединительном слое пьезокерамика–подложка вдоль двух ортогональных диссипативных осей резонатора.

Учитывая, что внутреннее трение в материале соединительного слоя велико (несмотря на малое значение коэффициента k , обычно $k = 10^{-4} - 10^{-3}$), в резонаторе может возникнуть значительный и не полностью компенсируемый калибровкой дрейф волновой картины.

Цель настоящей работы — рассмотреть основные факторы, влияющие на интенсивность неупругих процессов, протекающих во внутренних неразъемных соединениях в ВТГ, а именно в соединениях резонатор–основание и пьезоэлемент–подложка.

Неупругие процессы в соединении резонатор–основание. Рассмотрим неупругие процессы в типовом неразъемном соединении основания ВТГ с резонатором (рис. 1). Предположим, что резонатор имеет первую форму массового дефекта величиной m_1 , при этом неуравновешенная масса расположена на расстоянии от края оболочки, определяемом углом α .

При колебаниях оболочки резонатора наличие этой формы массового дефекта приводит к появлению поперечной силы F , момента, который связан с закреплением резонатора на расстоянии L от центра масс, равного $M_{11} \approx FL$, а также момента, связанного с продольным движением края оболочки резонатора, $M_{12} \approx FR$.

Сформированные движением массового дефекта силы и моменты сил прикладываются к материалу соединительного слоя неразъемного соединения резонатор–основание, деформируя материал слоя и вызывая рассеяние части энергии деформации, в результате чего добротность механического резонатора уменьшается.

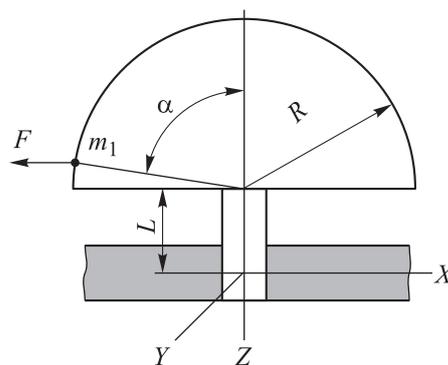


Рис. 1. Типовое неразъемное соединение основания ВТГ с резонатором

Движение резонатора вдоль оси X под действием силы F описывается уравнением

$$\ddot{x} + \xi_c \omega \dot{x} + \frac{SY}{Md_c} x = \frac{F}{M} \cos \omega t, \quad (5)$$

где ω — круговая частота колебаний; S и d_c — площадь и толщина соединительного слоя; M — масса резонатора. Упругие и неупругие свойства материала слоя задаются модулем упругости Y и внутренним трением ξ_c .

В установившемся режиме амплитуду маятниковых колебаний резонатора можно определить по формуле

$$x_0 = \frac{F}{M \sqrt{\left(\frac{SY}{d_c M} - \omega^2\right)^2 + \xi_c^2 \omega^4}}. \quad (6)$$

Поскольку обычно справедливо неравенство $\xi_c^2 \omega^4 \ll \left(\frac{SY}{d_c M} - \omega^2\right)^2$,

то $x_0 \approx \frac{Fd_c}{2SY}$.

Энергия деформации материала соединительного слоя:

$$W_c = Fx_0 = \frac{F^2 d_c}{2SY}. \quad (7)$$

Некоторая часть энергии деформации соединительного слоя, зависящая от интенсивности внутреннего трения в материале слоя, переходит в тепловую:

$$\Delta W_c = 2\pi \xi_c W_c = \frac{\pi d_c \xi_c F^2}{SY}. \quad (8)$$

Внутреннее трение, вносимое в резонатор, запишем так:

$$\Delta \xi = \frac{\xi_c W_c}{W} = \frac{\xi_c d_c F^2}{2SYW}, \quad (9)$$

где W — энергия колебаний резонатора.

Для тонкой полусферической оболочки, согласно [6], имеем

$$W = \frac{1,52961\pi R^2 h_0 \rho a^2 \omega^2}{8}, \quad (10)$$

где a — амплитуда колебаний резонатора.

Для простоты предположим, что вся неуравновешенная масса сосредоточена на краю резонатора, т. е. $\alpha = 90^\circ$, а $F = a\omega^2 m_1$. Тогда потери в области крепления

$$\Delta\xi = \frac{4m_1^2 \omega^2 \xi_c d_c}{1,52961\pi R^2 S Y h_{0p}}. \quad (11)$$

Дополнительное внутреннее трение (11) складывается с внутренним трением в резонаторе, образуя потери в резонаторе (3). В отбалансированном резонаторе неуравновешенная масса отсутствует (или скомпенсирована) и тогда потери $\Delta\xi$ равны нулю. В резонаторе с массовым дисбалансом возможны различные варианты. Так, в резонаторе с первой или третьей формами массового дефекта (2), когда значение силы F не зависит от угла θ , дополнительное внутреннее трение $\Delta\xi$ постоянно. При этом внутреннее трение вдоль диссипативных осей резонатора $\bar{\xi}_{\min}$ и $\bar{\xi}_{\max}$ увеличивается на одинаковую величину $\Delta\xi$. Добротность резонатора уменьшается, но разность $\bar{\xi}_{\max} - \bar{\xi}_{\min}$ (3) останется неизменной. Другими словами, скорость дрейфа волновой картины в этом случае будет той же. Присутствие второй формы массового дефекта либо комбинация первой и третьей форм ведут к зависимости силы F от угла θ . В этом случае дополнительное внутреннее трение $\Delta\xi$ также является функцией азимутального угла, что влечет изменение разности $\bar{\xi}_{\max} - \bar{\xi}_{\min}$ и, соответственно, скорости дрейфа волновой картины. Необходимо обратить внимание на сильную (квадратичную) зависимость вносимых потерь (11) от массового дисбаланса резонатора. Поэтому проведение балансировки резонаторов не только по четвертой, но и по первым трем формам массового дефекта является эффективной мерой для повышения точности ВТГ.

Рассмотрим вопрос о зависимости внутреннего трения от асимметрии соединения резонатор–основание (см. рис. 1). Предположим, что отверстия в основании, как и ножка резонатора, круглые, но резонатор установлен со смещением δ , в результате чего толщина соединительного слоя зависит от азимутального угла φ : $d_c(\varphi) = d_c + \delta \cos \varphi$. При маятниковых колебаниях резонатора под действием силы F слой клея или припоя будет деформирован с противоположных сторон на одну и ту же величину Δd_c , но с одной стороны материал слоя будет сжиматься, а с другой — растягиваться. Поскольку толщина материала с противоположных сторон ножки разная, возникающие силы упругости также будут отличаться, в результате чего различными будут и энергии деформации слоя.

Общая энергия деформации соединительного слоя может быть определена по формуле

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

Сомножитель $\left(1 - \delta^2/d_c^2 \right)^{-1}$ учитывает асимметрию соединения резонатора с основанием. Пусть, например, $\delta/d_c = 0,1$, тогда асимметрия внутреннего трения в таком соединении составляет $\sim 1\%$, приводя к соответствующему изменению амплитуды скорости дрейфа волновой картины.

Рассмотрим неразъемное соединение, в котором круглая ножка резонатора симметрично установлена в основание, отверстие в котором имеет форму эллипса. Толщина соединительного слоя при этом оказывается также неодинаковой: в направлении короткой оси эллипса (направленной для определенности вдоль координаты X) эта толщина равна d_c , а вдоль длинной оси эллипса (вдоль координаты Y) — $\delta + d_c$. Предположим, что $F = \text{const}$, тогда отношение энергий деформации материала соединительного слоя вдоль координат X и Y имеет вид

$$\frac{W_{cY}}{W_{cX}} = \frac{\delta + d_c}{d_c}. \quad (13)$$

Если, как и выше, $\delta/d_c = 0,1$, то и потери энергии колебаний в направлении координаты Y будут на 10% больше по сравнению с потерями в направлении координаты X .

Эти примеры показывают, что эллиптичность отверстия в основании либо эллиптичность сечения ножки резонатора влияют значительно сильнее на характеристики ВТГ, чем асимметрия соединения резонатор–основание.

При соединении резонатора с основанием возможно образование пузырей в материале соединительного слоя, что также влияет на потери энергии в соединении, поскольку изменяется площадь S . Пусть в этом слое имеется пузырь площадью s , тогда, по (7), энергия деформации слоя возрастает пропорционально $S/(S-s)$, изменяя скорость дрейфа стоячей волны.

Неупругие процессы в соединении пьезоэлементов с поверхностью резонатора. Как указано ранее, в конструкции ВТГ общего применения в качестве датчиков обычно используют пьезоэлементы. Это решение позволяет, наряду с использованием относительно простых металличе-

ских резонаторов, многократно снизить себестоимость таких приборов. Однако контактные датчики, припаянные или приклеенные к поверхности резонатора, увеличивают внутреннее трение в нем из-за диссипативных процессов, протекающих как в пьезоматериале, так и в соединительном слое между пьезоэлементом и резонатором. При колебаниях резонатора соединительный слой деформируется вместе с его поверхностью и часть энергии деформации необратимо рассеивается за счет внутреннего трения в слое.

Для оценки энергии деформации слоя W_c между пьезоэлементом и резонатором можно использовать формулу, включающую в себя геометрические параметры слоя и упругие характеристики его материала [9]:

$$W_c = \frac{bp^2}{3l^3} \mu Y d_c^3, \quad (14)$$

где b и l — ширина и длина соединительного слоя; p — амплитуда деформации слоя; μ — коэффициент.

Дополнительные потери $\Delta\xi$, вносимые соединительным слоем между пьезоэлементом и поверхностью, определяем по формуле

$$\Delta\xi = \frac{b\mu p^2 Y d_c^3 \xi_c}{3Wl^3}; \quad (15)$$

здесь W — энергия колебаний резонатора.

Энергия механических колебаний металлического цилиндрического резонатора с радиусом R , высотой H и толщиной стенки h_0 , совершающего изгибные колебания амплитудой a с круговой частотой ω , равна

$$W = \frac{\pi a^2 \omega^2 \rho R H h_0}{2}. \quad (16)$$

Учитывая, что $k = x_0^2/a^2$, из (15) и (16) получаем

$$\Delta\xi = \frac{2b\mu k Y d_c^3 \xi_c}{3l^3 \omega^2 \rho R H h_0}. \quad (17)$$

Из (17) следует, что вносимые в резонатор потери быстро растут с увеличением толщины соединительного слоя, поэтому как его толщина, так и идентичность толщины слоя для всех присоединенных пьезоэлементов оказывают большое влияние на характеристики ВТГ.

Особенности внутреннего трения в материале соединительного слоя. Под внутренним трением понимают совокупность физических процессов,

приводящих к необратимому переходу энергии механических колебаний в тепловую. Применительно к внутреннему трению в материале соединительного слоя основную роль играют два неупругих процесса: внутреннее трение в структуре материала $\xi_{c.o}$ и термоупругие потери $\xi_{c.т}$. Их сумма представляет собой общее внутреннее трение в слое ξ_c :

$$\xi_c = \xi_{c.o} + \xi_{c.т}. \quad (18)$$

Первый диссипативный процесс связан с движением атомов в структуре твердого тела при его деформации и превращением энергии колебаний в теплоту, вызванным движением атомов. Этот вид внутреннего трения присущ всем без исключения твердым телам, и теория этого явления изучена достаточно подробно. В литературе имеется много экспериментальных данных, в том числе по внутреннему трению в припоях [10–16], которые могут быть использованы для сборки деталей ВТГ.

Что касается внутреннего трения в отвержденных клеях, то оно также измеряется экспериментально методом динамического термомеханического анализа в широком диапазоне температур (примеры таких измерений см., например, в [17]). Экспериментальные данные по внутреннему трению в различных припоях со сравнительно невысокой температурой плавления (так, для сплава Sn–Bi она составляет 139 °С, а для сплава In–Sn — 120 °С) и в эпоксидном клее, взятые из [15, 18], приведены на рис. 2. Как следует из приведенных графиков, объемное внутреннее трение как в припоях, так и в клее достаточно сильно зависит от темпе-

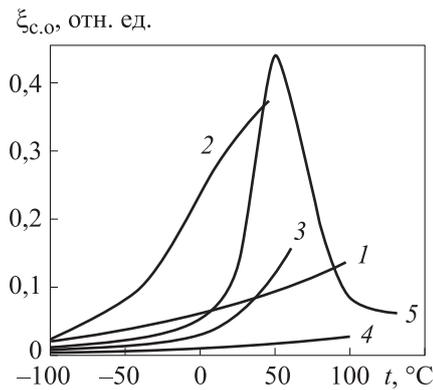


Рис. 2. Экспериментальные данные по внутреннему трению в различных припоях и эпоксидном клее:
1 — чистое олово; 2 — сплав In–Sn;
3 — сплав Sn–Bi; 4 — сплав Sn–3Ag–0.5Cu;
5 — клей K400

ратуры, а учитывая, согласно (17), квадратичную зависимость вносимых в резонатор потерь от толщины соединительного слоя, становится очевидной необходимость максимально возможного уменьшения толщины соединительного слоя.

При изгибной деформации тонкого соединительного слоя также имеют место термоупругие потери. Механизм этого вида внутреннего трения впервые изучен К. Зинером и остается общепринятым [19]. При изгибных

колебаниях тонкой пластины характер деформации материала на ее противоположных сторонах различен: на выпуклой стороне пластины материал расширяется, а на вогнутой сжимается. Если термический коэффициент линейного расширения материала (ТКЛР) не равен нулю, то такая деформация приводит к изменению температуры поверхностного слоя материала. Если на одной стороне температура немного увеличивается, то на другой (из-за обратного знака деформации) уменьшается. Образовавшиеся разности температур на противоположных сторонах пластины порождают тепловой поток между ними, выравнивающий эти температуры. Таким образом, результатом этого процесса является преобразование энергии изгибных колебаний в теплоту. Следует отметить, что термоупругие потери имеют место только при изгибных деформациях тонких образцов (в том числе слоев, скрепляющих пьезоэлементы с поверхностью резонатора), но их нет в соединении резонатора с основанием, так как изгибные колебания в нем отсутствуют. Оценку термоупругих потерь в тонком слое отвержденного клея можно выполнить по формуле [19], учитывающей теплофизические свойства материала слоя:

$$\xi_{с.т} = \frac{\alpha^2 Y T}{\rho C_p} \frac{\omega \gamma}{1 + \omega^2 \gamma^2} \left(\gamma = \frac{\rho C_p d_c^2}{\kappa \pi^2} \right), \quad (19)$$

где α — ТКЛР; T — температура; C_p — удельная теплоемкость; γ — характерное время теплопередачи сквозь слой; κ — удельная теплопроводность.

Как следует из (19), термоупругое внутреннее трение пропорционально квадрату ТКЛР материала, его максимум имеет место при толщине слоя, отвечающей равенству $\omega \gamma = 1$. Зависимости термоупругих потерь от толщины соединительного слоя для оловянного припоя и эпоксидного клея приведены на рис. 3. Для расчета приняты следующие параметры материалов. Клей: $Y = 2 \cdot 10^6$ МПа; $\alpha = 3,3 \cdot 10^{-5}$ К⁻¹; $C_p = 800$ Дж/(кг · К); $\rho = 2000$ кг/м³; $\kappa = 0,65$ Вт/(м · К). Припой: $Y = 5,5 \cdot 10^7$ МПа; $\alpha = 2 \cdot 10^{-5}$ К⁻¹; $C_p = 230$ Дж/(кг · К); $\rho = 7300$ кг/м³; $\kappa = 66$ Вт/(м · К). Частота колебаний 5 кГц. Из графиков на рис. 3 следует, что максимум термоупругих потерь в клеевом соединительном слое в целом гораздо меньше, чем в слое оловянного припоя. Для клея максимум термоупругих потерь имеет место при толщине слоя ~ 11 мкм, а для припоя — при толщине ~ 110 мкм. Использование припоя дает меньшие потери при малой (< 20 мкм) толщине слоя, если эта толщина сравнительно велика, то использование клея предпочтительно.

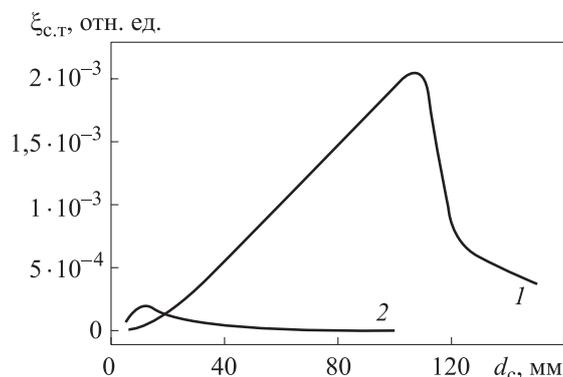


Рис. 3. Зависимости термоупругих потерь в соединительном слое от его толщины и материала для оловянного припоя (1) и эпоксидного клея (2)

Клеи, будучи полимерными структурами, имеют обратимые тиксотропные свойства, их особенностью является наличие устойчивой пространственной сетки и гистерезиса вязкостных свойств. Теория тиксотропии конденсированных полимерных систем основана на представлении о последовательном разрушении и самовосстановлении межмолекулярных структурных связей, приводящих к изменению параметров релаксации под воздействием деформации, температуры и с течением времени [20]. Поэтому отвержденные клеи в той или иной мере имеют гистерезис неупругих свойств при их нагреве и охлаждении. Особенно сильно эти эффекты проявляются вблизи температуры перехода T_g — температурном интервале, в котором скачкообразно изменяются механические свойства отвержденного клея, при этом внутреннее трение резко возрастает. Так, для эпоксидного клея K400 температура перехода составляет ~ 50 °С (см. рис. 2, кривая 5) и внутреннее трение в этом температурном интервале возрастает примерно на порядок. Поэтому для стабильной работы ВТГ температура перехода клея, используемого для внутренних неразъемных соединений его деталей (обычно эта температура указывается в технической документации клея), должна быть на 30–40 °С выше максимальной рабочей температуры прибора. Примерами таких клеев могут быть эпоксидные клеи EPO-TEK 74¹ с $T_g \approx 100$ °С и ABLEBOND 789-3² с $T_g = 126$ °С.

¹ EPO-TEK H74. Technical data sheet.

URL: www.epotek.com/docs/en/Datasheet/H74.pdf (дата обращения: 07.02.2025).

² ABLEBOND 789-3. Technical data sheet.

URL: www.bondingsource.com/techdata/789-3.pdf (дата обращения: 07.02.2025).

Заключение. Исследование диссипативных процессов, протекающих в типовых внутренних неразъемных соединениях ВТГ, позволило выявить, что конфигурация этих соединений и свойства материала соединительного слоя оказывают существенное влияние на характеристики прибора. При наличии в резонаторе массового дисбаланса часть энергии механических колебаний рассеивается в соединении резонатор–основание за счет объемного внутреннего трения в материале соединительного слоя. Этот эффект может быть значительно уменьшен путем балансировки резонатора по трем нижним формам массового дефекта. Вносимое в резонатор внутреннее трение, связанное с остаточным массовым дисбалансом, может быть дополнительно снижено путем уменьшения толщины соединительного слоя, увеличения площади контакта в соединении, а также выбора материала слоя с малым объемным внутренним трением и высоким значением модуля упругости. Осевая асимметрия соединения резонатор–основание также приводит к зависимости вносимых потерь от окружного угла, поэтому следует принимать меры по обеспечению необходимой точности при сборке прибора. В другом типе соединений, пьезоэлемент–резонатор, кроме объемного внутреннего трения следует также учитывать возникающие при изгибных колебаниях термоупругие потери. Расчеты показывают, что использование паяных соединений такого типа предпочтительнее по сравнению с клеевыми при толщине слоя менее ~ 20 мкм. Кроме того, тиксотропные свойства клеев приводят к гистерезису их неупругих свойств при нагреве и охлаждении и, соответственно, к погрешностям ВТГ, работающих в широком диапазоне температур. Для уменьшения этих эффектов следует использовать клеи с как можно более высокой температурой перехода.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Жбанов Ю.К., Каленова Н.В. Поверхностный дебаланс волнового твердотельного гироскопа. *Известия РАН. МТТ*, 2001, № 3, с. 11–18.
- [2] Жбанов Ю.К., Журавлёв В.Ф. О балансировке волнового твердотельного гироскопа. *Известия РАН. МТТ*, 1998, № 4, с. 4–16.
- [3] Басараб М.А., Матвеев В.А., Лунин Б.С. и др. Влияние неоднородности толщины оболочки волнового твердотельного гироскопа на параметры дебаланса. *Гироскопия и навигация*, 2016, № 4, с. 14–24. EDN: XUXLSJ
- [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, с. 18–31. EDN: DWNWWD

- [5] Gerrard D.D., Ng E.J., Ahn C.H., et al. Modeling the effect of anchor geometry on the quality factor of bulk mode resonators. *18th TRANSDUCERS*, 2015, pp. 1997–2000. DOI: <https://doi.org/10.1109/TRANSDUCERS.2015.7181346>
- [6] Egarmin N.E., Yurin V.E. Introduction to theory of vibratory gyroscopes. Moscow, Binom, 1993.
- [7] Распопов В.Я., Лихошерст В.В. Волновые твердотельные гироскопы с металлическим резонатором. *Гироскопия и навигация*, 2023, т. 31, № 1, с. 26–44. EDN: BQEDWV
- [8] Лунин Б.С., Басараб М.А. Влияние диссипативных свойств пьезокерамических датчиков на характеристики волновых твердотельных гироскопов. *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика*, 2025, № 3, с. 31–35. DOI: <https://doi.org/10.25791/pribor.3.2025.1565>
- [9] Ventsel E., Krauthammer T. Thin plates and shells. New York, CRC Press, 2001.
- [10] Negm S.E.A., Modhny A.S.A., Ahmad S.I. Investigation of thermal and mechanical properties of Sn–Zn and Sn–Zn–Bi near-eutectic solder alloys. *Results Mater.*, 2022, vol. 15, art. 100316. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2022.100316>
- [11] Blanter M.S., Golovin I.S., Neuhauser H., et al. Internal friction in metallic materials. A handbook. Heidelberg, Springer, 2007.
- [12] Постников В.С. Внутреннее трение в металлах. М., Металлургия, 1974.
- [13] Сапожников К.В., Голяндин С.Н., Кустов С.Б. Температурная зависимость внутреннего трения поликристаллического индия. *Физика твердого тела*, 2010, т. 52, № 12, с. 2341–2348. EDN: RCSFWF
- [14] Fujii Y., Ono T. Temperature dependence of Young's modulus and internal friction in Sn–Zn–Al lead-free solder. *J. Solid Mech. Mater. Eng.*, 2008, vol. 2, no. 8, pp. 981–986. DOI: <https://doi.org/10.1299/jmmp.2.981>
- [15] Chang S.H., Wu S.K. Low-frequency damping properties of eutectic Sn–Bi and In–Sn solders. *Scip. Mater.*, 2011, vol. 64, no. 8, pp. 757–760. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2010.12.035>
- [16] Chang S.H., Wu S.K., Kuo C. Effect of reinforced multiwall carbon nanotubes on the damping characteristics of Sn–Ag–Cu lead-free solder. *Mater. Lett.*, 2020, vol. 276, art. 128196. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.128196>
- [17] Qiao L., Eastel A.J., Bolt C.J., et al. Thermomechanical analysis and performance tests of some EPI wood adhesives. *Pigm. Resin. Technol.*, 2000, vol. 29, no. 4, pp. 229–237. DOI: <https://doi.org/10.1108/03699420010339371>
- [18] Лунин Б.С., Басараб М.А. Диссипация энергии колебаний в соединении пьезокерамика–подложка. *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика*, 2024, № 5, с. 1–7. EDN: QAQDRH
- [19] Zener C. Internal friction in solids II. General theory of thermoelastic internal friction. *Phys. Rev.*, 1938, vol. 53, no. 1, pp. 90–99. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.53.90>
- [20] Малкин А.Я., Исаев А.И. Реология: концепции, методы, приложения. СПб., Профессия, 2017.

Лунин Борис Сергеевич — д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова (Российская Федерация, 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 3).

Басараб Михаил Алексеевич — д-р физ.-мат. наук, доцент, заведующий кафедрой «Информационная безопасность» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Лунин Б.С., Басараб М.А. Неупругие процессы во внутренних неразъемных соединениях механических резонаторов волновых твердотельных гироскопов. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2025, № 4 (153), с. 30–45. EDN: MADNSW

**INELASTIC PROCESSES IN INTERNAL PERMANENT JOINTS
OF MECHANICAL RESONATORS OF THE WAVE SOLID-STATE
GYROSCOPES**

B.S. Lunin¹

luninboris@yandex.ru

M.A. Basarab²

basarab@bmstu.ru

¹ Lomonosov MSU, Moscow, Russian Federation

² BMSTU, Moscow, Russian Federation

Abstract

The article discusses the dissipative processes occurring in typical internal permanent (adhesive and soldered) connections of wave solid-state gyroscopes, implemented when assembling a resonator with a base and installing piezoelectric elements on its surface. Part of the resonator oscillation energy is dissipated due to volumetric and thermoelastic inelastic processes in the material of the connecting layers, which significantly worsens the characteristics of the device. This effect can be reduced by balancing the resonator, increasing the area of the connection, decreasing the thickness of the connecting layer, and selecting a layer material with low volumetric internal friction. The axial asymmetry of such a connection leads to the dependence of the insertion losses on the circumferential angle. In another type of connections, piezoelectric element-resonator, in addition to the volumetric internal friction, thermoelastic losses arising during bending vibrations should also be taken into account. Calculations show that the use of soldered connections

Keywords

*Wave solid-state gyroscope,
dissipation, internal friction*

of this type is preferable compared to adhesive ones with a layer thickness of less than $\sim 20 \mu\text{m}$. In addition, the thixotropic properties of adhesives lead to hysteresis of their inelastic properties during heating and cooling, and, accordingly, to errors in wave solid-state gyroscopes operating in a wide temperature range. The influence of the configuration of internal permanent connections and the properties of the material of the connecting layer on the dissipation of oscillation energy is analyzed

Received 04.06.2025

Accepted 04.07.2025

© Author(s), 2025

REFERENCES

- [1] Zhbanov Yu.K., Kalenova N.V. Surface imbalance of a wave solid-state gyroscope. *Izvestiya RAN. MTT*, 2001, no. 3, pp. 11–18 (in Russ.).
- [2] Zhbanov Yu.K., Zhuravev V.F. On balancing a wave solid-state gyroscope. *Izvestiya RAN. MTT*, 1998, no. 4, pp. 4–16 (in Russ.).
- [3] Basarab M.A., Matveev V.A., Lunin B.S., et al. Influence of nonuniform thickness of hemispherical resonator gyro shell on its unbalance parameters. *Gyroscopy Navig.*, 2017, vol. 8, no. 2, pp. 97–103. DOI: <https://doi.org/10.1134/S207510871702002X>
- [4] Sharma N.G., Sundararadzhana T., Singkh G.S. Effect of geometric imperfections on anchor loss and characterisation of a gyroscope resonator with high quality factor. *Gyroscopy Navig.*, 2020, vol. 11, no. 3, pp. 206–213. DOI: <https://doi.org/10.1134/S2075108720030074>
- [5] Gerrard D.D., Ng E.J., Ahn C.H., et al. Modeling the effect of anchor geometry on the quality factor of bulk mode resonators. *18th TRANSDUCERS*, 2015, pp. 1997–2000. DOI: <https://doi.org/10.1109/TRANSDUCERS.2015.7181346>
- [6] Egarmin N.E., Yurin V.E. Introduction to theory of vibratory gyroscopes. Moscow, Binom, 1993.
- [7] Raspopov V.Ya., Likhosherst V.V. HRG with a metal resonator. *Gyroscopy Navig.*, 2023, vol. 14, no. 1, pp. 14–26. DOI: <https://doi.org/10.1134/S2075108723010066>
- [8] Lunin B.S., Basarab M.A. The influence of dissipative properties of piezoceramic sensors on the characteristics of wave solid-state gyroscopes. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol, diagnostika* [Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics], 2025, no. 3, pp. 31–35 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.25791/pribor.3.2025.1565>
- [9] Ventsel E., Krauthammer T. Thin plates and shells. New York, CRC Press, 2001.
- [10] Negm S.E.-A., Modhny A.S.A., Ahmad S.I. Investigation of thermal and mechanical properties of Sn–Zn and Sn–Zn–Bi near-eutectic solder alloys. *Results Mater.*, 2022, vol. 15, art. 100316. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2022.100316>
- [11] Blanter M.S., Golovin I.S., Neuhauser H., et al. Internal friction in metallic materials. A handbook. Heidelberg, Springer, 2007.

- [12] Postnikov V.S. Vnutrennee trenie v metallakh [Internal friction in metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1974.
- [13] Sapozhnikov K.V., Golyandin S.N., Kustov S.B. Temperature dependence of the internal friction of polycrystalline indium. *Phys. Solid State*, 2010, vol. 52, no. 12, pp. 2501–2509. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063783410120103>
- [14] Fujii Y., Ono T. Temperature dependence of Young's modulus and internal friction in Sn–Zn–Al lead-free solder. *J. Solid Mech. Mater. Eng.*, 2008, vol. 2, no. 8, pp. 981–986. DOI: <https://doi.org/10.1299/jmmp.2.981>
- [15] Chang S.H., Wu S.K. Low-frequency damping properties of eutectic Sn–Bi and In–Sn solders. *Scrip. Mater.*, 2011, vol. 64, no. 8, pp. 757–760. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2010.12.035>
- [16] Chang S.H., Wu S.K., Kuo C. Effect of reinforced multiwall carbon nanotubes on the damping characteristics of Sn–Ag–Cu lead-free solder. *Mater. Lett.*, 2020, vol. 276, art. 128196. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.128196>
- [17] Qiao L., Eastel A.J., Bolt C.J., et al. Thermomechanical analysis and performance tests of some EPI wood adhesives. *Pigm. Resin. Technol.*, 2000, vol. 29, no. 4, pp. 229–237. DOI: <https://doi.org/10.1108/03699420010339371>
- [18] Lunin B.S., Basarab M.A. Dissipation of vibration energy in a piezoceramic-substrate connection. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol, diagnostika* [Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics], 2024, no. 5, pp. 1–7 (in Russ.). EDN: QAQDRH
- [19] Zener C. Internal friction in solids II. General theory of thermoelastic internal friction. *Phys. Rev.*, 1938, vol. 53, no. 1, pp. 90–99. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.53.90>
- [20] Malkin A.I., Isayev A.I. Rheology: concepts, methods and applications. Toronto, ChemTec Publishing, 2006.

Lunin B.S. — Dr. Sc. (Eng.), Leading Researcher, Chemistry Faculty, Lomonosov MSU (Leninskie gory 1, str. 3, GSP-1, Moscow, 119991 Russian Federation).

Basarab M.A. — Dr. Sc. (Phys.-Math.), Assoc. Professor, Head of the Department of Information Security, BMSTU (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Lunin B.S., Basarab M.A. Inelastic processes in internal permanent joints of mechanical resonators of the wave solid-state gyroscopes. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2025, no. 4 (153), pp. 30–45 (in Russ.). EDN: MADNSW