

МЕХАНИКА

Научная статья

УДК 629.7.054

DOI: 10.17072/1993-0550-2025-1-41-51

<https://elibrary.ru/dvypdm>**Исследование влияния структуры подвеса инерционной массы стеклянного микромеханического акселерометра на его характеристики****Марина Александровна Барулина¹, Алексей Викторович Голиков²,
Елена Владимировна Панкратова³, Ольга Викторовна Маркелова⁴**^{1,2,3,4}Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем точной механики и управления Российской Академии наук, г. Саратов, Россия¹marina@barulina.ru²golikov@iptmuran.ru³pankratova@iptmuran.ru⁴markelova@iptmuran.ru

Аннотация. В статье рассматривается перспективный микромеханический акселерометр из радиостойкого стекла, выполненный по технологии вытягивания из стеклянных стержней и трубок. Разработана альтернативная конструктивная схема маятникового акселерометра с подвесом инерционной массы, сформированном из стеклянных структур двух форм – гексагональной и трубчатой. С помощью методов конечно-элементного моделирования выполнен сравнительный анализ механических характеристик моделей акселерометра с подвесами инерционной массы из двух разных стеклянных структур, а именно, для обеих моделей выполнен расчет напряжений и деформаций при ускорениях в диапазоне до 50g, а также расчет собственных частот. Анализ полученных результатов показал, обе схемы имеют близкие значения указанных характеристик, однако детальное рассмотрение распределения напряжений в структурах подвеса позволяет сделать вывод, что гексагональная структура более устойчива к разрушению. Также сделана оценка возможной чувствительности датчика для двух вариантов подвеса инерционной массы. Показано, что в обоих случаях при ускорениях до 50g емкостной датчик обладает достаточным диапазоном изменения емкости для регистрации ускорения.

Ключевые слова: акселерометр; МЭМС; чувствительный элемент; радиостойкое стекло; инерционная масса; моделирование; конечно-элементная модель

Для цитирования: Барулина М.А., Голиков А.В., Панкратова Е.В., Маркелова О.В. Исследование влияния структуры подвеса инерционной массы стеклянного микромеханического акселерометра на его характеристики // Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика. 2025. Вып. 1(68). С. 41–51. DOI: 10.17072/1993-0550-2025-1-41-51. <https://elibrary.ru/dvypdm>.



Данная работа © 2025 Барулина М.А., Голиков А.В., Панкратова Е.В., Маркелова О.В. распространяется под лицензией CC BY 4.0. Чтобы просмотреть копию этой лицензии, посетите <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке в рамках темы государственного задания министерства образования и науки РФ №125020501400-6.

Статья поступила в редакцию 21.01.2025; одобрена после рецензирования 20.02.2025; принята к публикации 16.03.2025.

MECHANICS

Research article

Investigation of the Influence of Inertial Mass Suspension Structure of Glass Micromechanical Accelerometer on its Properties

Marina A. Barulina¹, Aleksey V. Golikov², Elena V. Pankratova³, Olga V. Markelova⁴

^{1,2,3,4}Precision Mechanics and Control Institute, Russian Academy of Sciences, Saratov, Russia

¹marina@barulina.ru

²golikov@iptmuran.ru

³pankratova@iptmuran.ru

⁴markelova@iptmuran.ru

Abstract. The paper deals with a promising MEMS accelerometer made of radiation-resistant glass using the technology of pulling from glass rods and tubes. An alternative structural scheme of a pendulum accelerometer with an inertial mass suspension formed from glass structures of two shapes - hexagonal and tubular - is developed. By using the finite-element modeling methods, a comparative analysis of mechanical characteristics of MEMS models with different inertial mass suspensions has been performed, namely, for both models stresses and deformations at accelerations in the range up to 50g have been calculated. The calculation of natural frequencies was also performed. The analysis of the obtained results demonstrated that both schemes have close values of these characteristics, but a detailed consideration of the stress distribution in the suspension structures allows us to conclude that the hexagonal structure is more resistant to failure. The possible sensitivity of the sensor for two variants of the inertial mass suspension is also evaluated. It is proved that in both cases at accelerations up to 50g the capacitive sensor has a sufficient range of capacitance variation for acceleration registration.

Keywords: *accelerometer; MEMS; sensing element; radiation-resistant glass; inertial mass; modeling; finite element model*

For citation: Barulina, M. A., Golikov, A. B., Pankratova, E. B. and Markelova, O. B. (2025), "Investigation of the Influence of Inertial Mass Suspension Structure of Glass Micromechanical Accelerometer on its Properties", *Bulletin of Perm University. Mathematics. Mechanics. Computer Science*, no. 1(68), pp. 41-51. (In Russ.). DOI: 10.17072/1993-0550-2025-1-41-51. <https://elibrary.ru/dvypdm>.

Acknowledgments: the work was financially supported by the state assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation No 125020501400-6.

The article was submitted 21.01.2025; approved after reviewing 20.02.2025; accepted for publication 16.03.2025.

Введение

Разработка новых конструктивных схем и применяемых материалов для производства МЭМС датчиков является актуальной задачей. В частности, микромеханические акселерометры (ММА) имеют широкий спектр применения в различных технических устройствах [1, 2]. Их широкое распространение обусловлено относительно невысокой стоимостью производства, малыми габаритами и массой, низким энергопотреблением.

ММА предназначены для измерения проекции линейного ускорения на ось чувствительности.

Одной из разновидностей конструктивных схем такого датчика является ММА маятникового типа. Чувствительным элементом такого прибора является физический маятник [1–3]. При воздействии на маятник составляющей линейного ускорения в направлении измерительной оси прибора маятник отклоняется относительно корпуса. Это отклонение фиксируется емкостным датчиком и передается в измерительную схему прибора.

Данная работа является продолжением исследований авторов по разработке возможных конструктивных схем акселерометра из радиостойкого стекла [4, 5] и перспектив по его применению.

В работе решаются следующие задачи:

- разработка конструктивной схемы маятникового акселерометра из радиостойкого стекла марки К108, удовлетворяющей требованиям по допустимым напряжениям в материале прибора, собственным частотам, обеспечению достаточной чувствительности при измерении ускорений до 50g с подвесом инерционной массы (ИМ) из стеклянных трубок круглой и гексагональной формы;
- расчет и сравнительная оценка механических характеристик ММА с разными подвесами ИМ;
- расчет параметров предполагаемого емкостного датчика при различных значениях ускорения.

1. Конструкция акселерометра

Исходный прототип ММА, изображенный на рис. 1, представляет собой ММА маятникового типа, выполненный из стеклянных стержней методом вытягивания под воздействием высокой температуры. ИМ и подвес сформированы путем химического травления растворимого стекла.



Рис. 1. Прототип стеклянного ММА

В предыдущих работах [4, 5] расчеты механических свойств прототипа были сделаны с осью чувствительности, размещенной перпендикулярно плоскости ММА. В такой конфигурации полученные результаты не позволяют говорить о возможности применить прототип на практике в силу недостаточной чувствительности, так как в этом случае предполагаемый емкостной датчик работает по принципу изменяемой площади пластин конденсатора, сформированных на боковых гранях ИМ и основания, и при малых перемещениях ИМ масштабный коэффициент очень мал для регистрации ускорения.

В настоящей работе предложена альтернативная конструктивная схема. Особенности предложенной схемы состоят, во-первых, в том, что для обеспечения достаточного отклонения ИМ для регистрации ускорения структура подвеса ИМ должна быть сформирована из стеклянных трубок вместо стержней. Во-вторых, для реализации емкостного датчика для съема полезного сигнала предлагается сформировать гребенку на одной грани ИМ и соседней грани основания с интегрированной или напыленной на ее поверхности токопроводящей пластины. Предлагаемая схема и общий вид представлены на рис. 2.

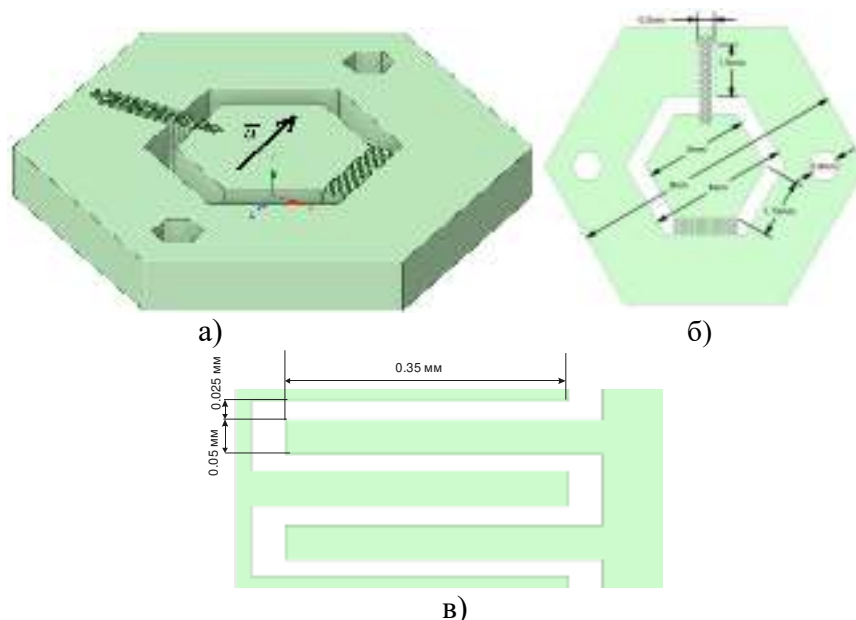


Рис. 2. Общий вид (а), размеры (б) и фрагмент гребенки с размерами (в)

При выбранных размерах ИМ и пластин гребенки возможно сформировать 12 гребенок, образующих емкостной датчик перемещений.

В представленной конструкции ММА подвес длиной 2 мм представляет собой структуру из трех рядов спаянных между собой стеклянных трубок круглой или гексагональной формы, размером 125 мкм и толщиной стенки 10–20 мкм, что должно обеспечить достаточную упругость подвеса. В данной работе толщина стенки трубок, составляющих подвес ИМ, принята равной 20 мкм. Толщина датчика – 1 мм. Общая масса модели составляет приблизительно 0.12 г, а масса ИМ – 0.02 г.

Вся конструкция ММА выполняется путем вытяжки преформы, набранной из стеклянных трубок и штабиков. На рис. 3 показаны два примера, получаемых после перетяжки структур из стеклянных трубок без откачки воздуха и с откачкой.

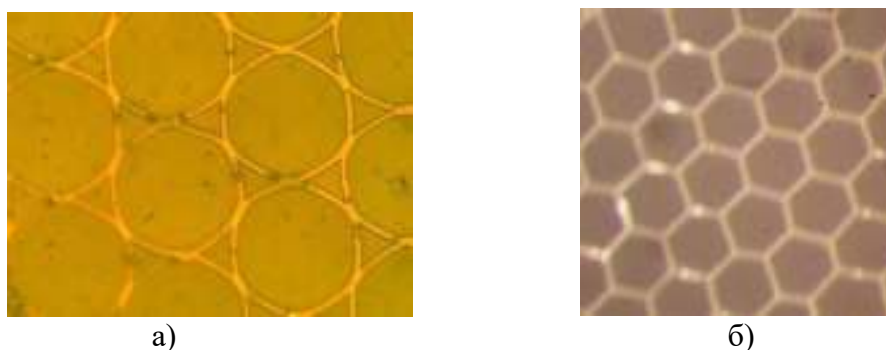


Рис. 3. Структуры, получающиеся после совместной перетяжки сборки из тонкостенных трубок; а) без откачки воздуха; б) с откачкой воздуха

В первом случае (рис. 3а) спекание происходит по линии соприкосновения трубок в пакете. Форма трубок остается близкой к круглой, между трубками образуются треугольные зазоры. Во втором случае зазоры между элементами отсутствуют, при этом форма трубок получается гексагональной. Для получения структур без воздушных зазоров между элементами используется вакуумирование при перетяжке. Структура, собранная из отдельных элементов, помещается в трубку большого диаметра (оболочку). При подаче преформы в печь, верхний конец трубки подключается через переходник к вакуумному насосу и в течение процесса поддерживается давление 0.2–0.3 атм.

На рисунке 4 показан фрагмент модели ММА с подвесом из трубок круглой и гексагональной форм, с геометрией, близкой к реально получаемой на производстве.

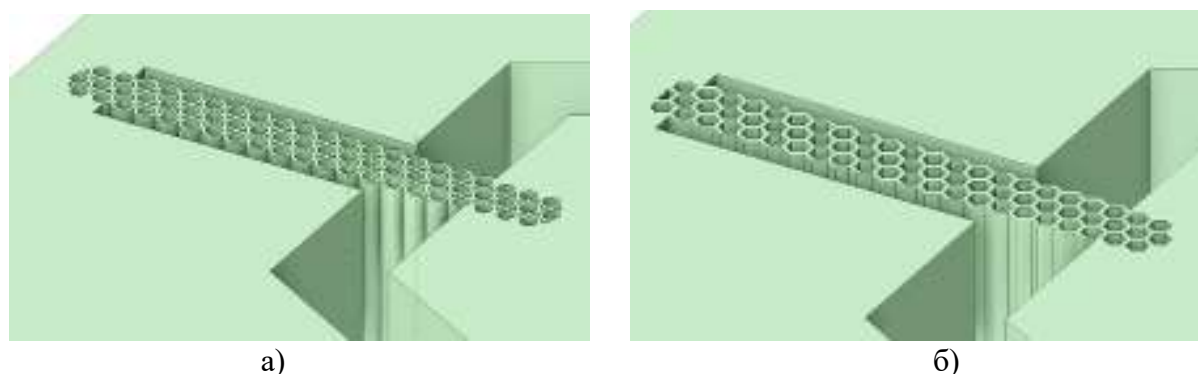


Рис. 4. Модель подвеса ИМ – а) круглой формы; б) гексагональной

2. Расчет механических параметров и частотных характеристик

В отличие от предыдущих расчетов, предложено разместить ось чувствительности ММА вдоль оси Z, перпендикулярно оси подвеса (рис. 2а). Таким образом, обеспечивается большая подвижность ИМ и, соответственно, повышается чувствительность.

Для определения механических напряжений и деформации выполнен расчет предлагаемой конструкции с разными типами подвеса в диапазоне ускорений до 50g для постоянных значений линейного ускорения.

Для расчетов в работе использовалась САПР для решения задач механики деформируемого твердого тела и механики конструкций. Полученные результаты по напряжениям и деформации ИМ представлены в табл. 1, 2.

Таблица 1. Максимальные деформации, мкм

Ускорение, g	1	10	20	30	40	50
Трубчатая структура	0.24	2.39	4.78	7.17	9.56	11.96
Гексагональная структура	0.19	1.92	3.85	5.77	7.7	9.62

Таблица 2. Эквивалентные напряжения, МПа

Ускорение, g	1	10	20	30	40	50
Трубчатая структура	0.38	3.82	7.64	11.46	15.28	19.1
Гексагональная структура	0.45	4.51	9.02	13.53	18.04	22.55

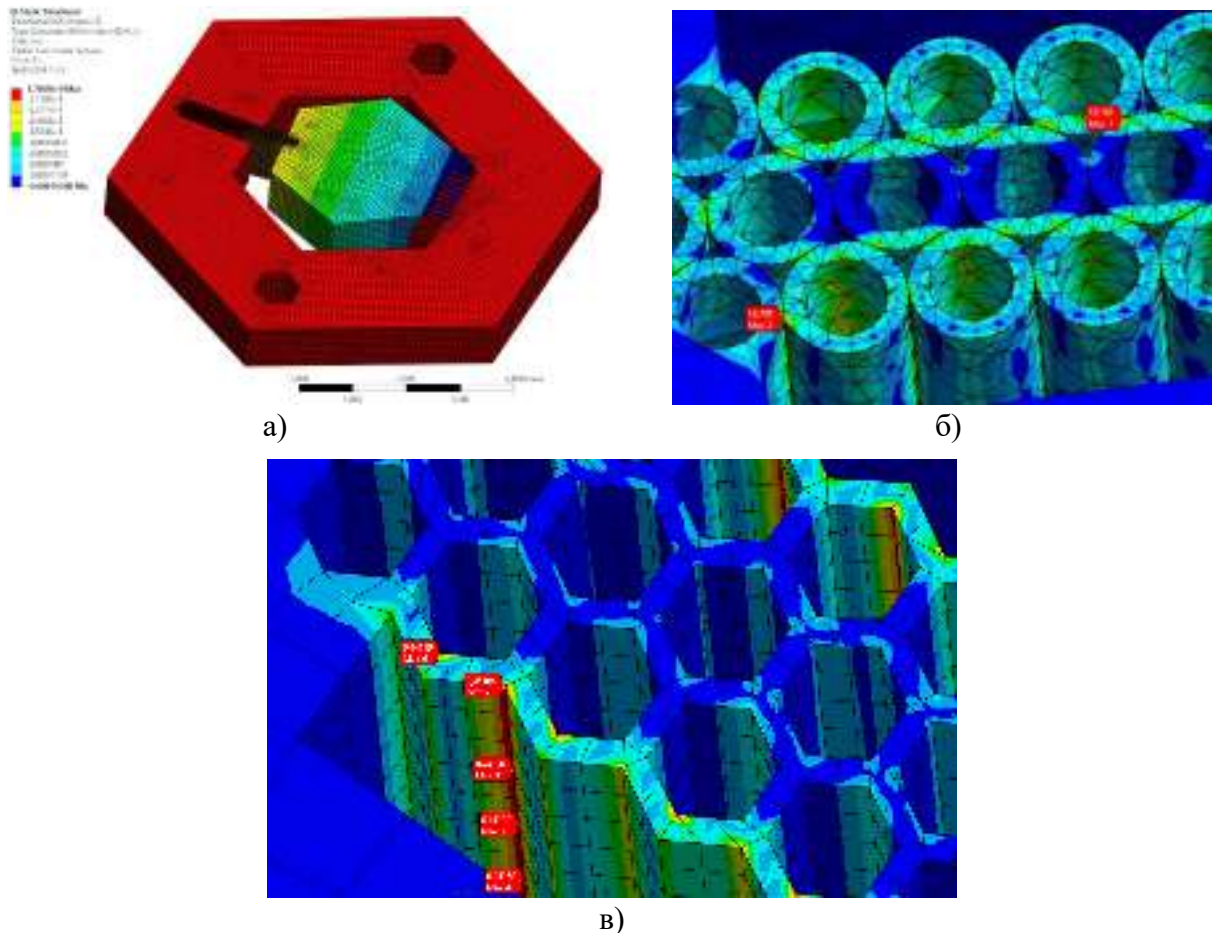


Рис. 5. Иллюстрация деформации при отклонении ИМ под воздействием линейного ускорения (а) и механических напряжений в трубчатой структуре (б) и гексагональной структуре (в)

Рассматривая поле напряжений в структуре подвеса, можно заметить важные различия в распределении напряжений. В случае трубок видно (рис. 5б), что максимальные напряжения сосредоточены в точках спекания отдельных трубок среднего и внешних рядов, в случае шестиугольников напряжения распределены сравнительно равномерно по наружной стороне внешних рядов (рис. 5в).

На графике (рис. 6) по результатам расчета приведена зависимость максимального отклонения ИМ в зависимости от приложенного ускорения.

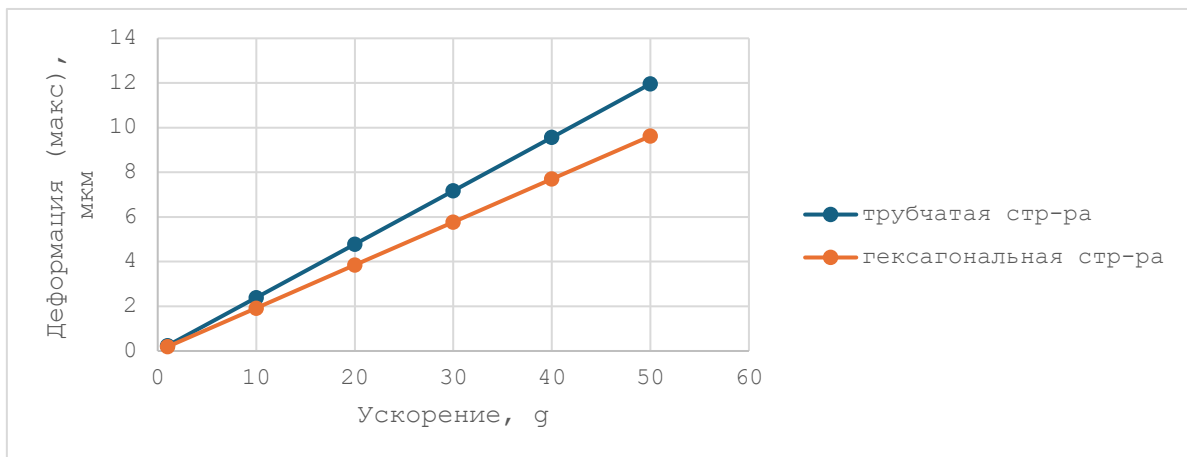


Рис. 6. Смещение ИМ

Из графика на рис. 6 видно, что отклонение ИМ носит линейный характер. Максимальное отклонение ИМ в зоне гребенки составило 11.96 мкм для трубчатой структуры и 9.62 мкм для гексагональной структуры соответственно (см. табл.). Такие значения являются достаточным для обеспечения приемлемой чувствительности датчика.

Рассмотрим частотные характеристики ММА.

В результате проведенного модального анализа получены следующие значения пяти собственных частот (Гц): для подвеса из трубчатой структуры 1223.7, 5039.6, 8998.3, 14400, 40596; для подвеса гексагональной структуры 1363.4, 3869.7, 7244.9, 15091, 36534.

Как видно из полученных результатов расчета модели, значения собственных частот для разных подвесов близки по значениям. У модели с подвесом гексагональной структуры значение первой моды несколько выше.

Предъявляемые требования по частоте вибрационных нагрузок авиакосмической техники обычно находятся в пределах до 180 Гц [6–7], поэтому полученные значения позволяют утверждать, что возникновение резонанса в рассматриваемой конструкции ММА исключено при его применении в системах управления.

3. Расчет изменения емкости датчика

Предлагаемая схема емкостного датчика является стандартной для такого типа МЭМС и представляет собой емкостной мост [8].

Оценить изменение емкости датчика можно по простой формуле, которая выводится из формулы емкости плоского конденсатора:

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d},$$

где ε – диэлектрическая проницаемость среды между обкладками конденсатора (для воздуха – 1), ε_0 диэлектрическая постоянная, S – площадь, d – расстояние между пластинами.

Изменение емкости при смещении пластин гребенки вычисляется по формуле, которая представляет собой разность емкостей на смежных пластинах конденсаторов при перемещении гребенки на расстояние x , при условии, что $x \ll d$ [9]:

$$\Delta C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d^2} x$$

где x – смещение ИМ.

Вычисленное по данной формуле ожидаемое максимальное изменение емкости при предложенной геометрии гребенки (рис. 2в), для трубчатой структуры подвеса в рассмотренном диапазоне ускорений составляет значения от 0.14 до 7.11 пФ, а для гексагональной структуры от 0.11 до 5.72 пФ соответственно.

Таким образом, величины изменения емкости датчика достаточны для регистрации ускорений в указанных диапазонах.

4. Обсуждение результатов

Предложена конструктивная схема ММА из перспективного радиостойкого стекла. Выполнено моделирование и расчет механических и частотных характеристик модели ММА при постоянных значениях линейного ускорения в диапазоне от 1 до 50g.

Полученные результаты численного моделирования позволяют сделать вывод о том, что предложенная схема имеет хорошие перспективы реального применения, однако требуется экспериментальное подтверждение полученных результатов.

Сравнительный анализ результатов расчета механических и частотных характеристик для модели с подвесом ИМ из трубок круглой и гексагональной форм показал, что различия незначительны. В случае деформаций и напряжений выигрывает трубчатая структура подвеса, у которой при одинаковых ускорениях большее смещение ИМ и меньшее напряжение, а в случае частотных характеристик большее значение первой моды имеет гексагональная структура, т.е. лучшая устойчивость к вибрационным нагрузкам. Однако эти различия незначительны, поэтому выбор подвеса ИМ, на взгляд авторов, необходимо принимать из других соображений.

Предполагается, что подвес ИМ из трубчатой структуры имеет слабую устойчивость к разрушению ввиду того, что спекание между отдельными трубками происходит по очень малой площади, в точке касания (рис. 3а) и максимальные напряжения сосредоточены именно в этих точках (рис. 5б). Поэтому при максимальных напряжениях высока вероятность разрушения подвеса. Совсем другая ситуация с гексагональной структурой подвеса. В этом случае подвес представляет собой сплошную структуру из сот, в которой напряжения распределены сравнительно равномерно по наружной стороне внешних рядов элементов, его составляющим.

Таким образом, можно сделать предположение, что гексагональная структура подвеса имеет более высокую устойчивость к разрушению при высоких ударных и вибрационных нагрузках.

Безусловно, следует учесть тот факт, что при расчетах использовалась идеальная геометрия структур подвеса, и в реальном изделии их форма будет несколько отличаться (неидеальная окружность, шестигранники со скругленными углами и т.д.), но качественно на общую картину полученных результатов это не повлияет.

Также следует отметить, что, используя разработанную модель, возможно подобрать необходимую чувствительность ММА для разных диапазонов ускорений путем изменения структуры и геометрии трубок подвеса ИМ.

Кроме того, необходим анализ возможных остаточных напряжений [10, 11] в подвесе ИМ ММА, которые характерны для рассматриваемого в статье материала, а также анализ поведения предложенной конструкции при воздействии переменных ускорений и вибрационных нагрузок, что является предметом дальнейших исследований.

На момент написания статьи ведется проработка и обсуждение возможности изготовления опытных образцов ММА по предложенной модели.

Список источников

1. *Микромеханические приборы: учеб. пособие* / В.Я. Распопов. Тул. Гос. университет. Тула, 2002. 392 с.
2. *Датчики, приборы и системы авиакосмического приборостроения в условиях тепловых воздействий* / В.Э. Джашинов, В.М. Панкратов / под ред. акад. РАН В.Г. Пешехонова, СПб: ГНЦ РФ ЦНИИ "Электроприбор". 2005. 402 с. ISBN: 5-900780-57-0 EDN: QNSEZN.
3. *Кочурина Е.С., Анчутин С.А., Калугин В.В. и др. Разработка чувствительного элемента микромеханического акселерометра* // Известия вузов. Электроника. 2022. Т. 27. № 1. С. 59–67. 10.24151/1561-5405-2022-27-1-59-67. DOI: 10.24151/1561-5405-2022-27-1-59-67 EDN: JPSKAX.

4. Костенко В.Д., Барулина М.А. К вопросу использования радиостойкого стекла для изготовления микромеханического акселерометра: в сб. Международный семинар "Навигация и управление движением" (NMC 2023) / под ред. В.Г. Пешехонова, академика РАН, и члена-корреспондента РАН О.А. Степанова, проф. / АО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", Санкт-Петербург, Россия, 2023. С. 21–24. EDN: GWBGBI.
5. Костенко В.Д., Барулина М.А., Щербаков А.В. Перспективы использования стеклянных микромеханических акселерометров для космических спутников / RusNanoSat-2023: сб. тезисов докладов пятого российского симпозиума по наноспутникам с международным участием. Самара, 06–08 сентября 2023 г. Самара: Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева, 2023. С. 132–134. EDN: GNOZHJ.
6. ГОСТ 23718-2014. Межгосударственный стандарт. Самолеты и вертолеты пассажирские и транспортные. Допустимые уровни вибрации в салонах и кабинах экипажа и методы измерения вибрации. Взамен ГОСТ 2371-93. Введ. 2015-01-01. М.: Стандартинформ 2019. С. 20.
7. Безмозгий И.М., Софинский А.Н., Чернягин А.Г. Моделирование в задачах вибропрочности конструкций ракетно-космической техники // Космическая техника и технологии. 2014. № 3 (6). С. 71–80. EDN: TEMDRT.
8. Paing S.T., Kalugin V.V., Kochurina E.S. Modeling and optimization of MEMS comb type capacitive acceleration sensor. Proc. Univ. Electronics. 2023. Vol. 28, № 4. P. 452–460. DOI: 10.24151/1561-5405-2023-28-4-452-460 EDN: LWHTER.
9. Топильский В.Б. Микроэлектронные измерительные преобразователи: учеб. пособие. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. 493 с. ISBN: 978-5-9963-0635-0 EDN: QMXKKX.
10. Тажибаев К.Т. Определение остаточных и действующих напряжений поляризации-акустическим методом / К.Т. Тажибаев, Д.К. Тажибаев, М.С. Акматалиева // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2018. № 4. С. 134–139. EDN: XNKDQD.
11. Бургер И.А. Остаточные напряжения. М.: 1963.

References

1. Raspopov, V. Y. (2002), "*Mikromekhanicheskie pribory Uchebnoe posobie*" [Micro-mechanical devices Tutorial], Tula State University, Tula, Russia.
2. Dzhashitov, V. E. and Pankratov, V. M. (2005), "*Datchiki, pribory i sistemy aviakosmicheskogo priborostroeniya v usloviyah teplovyh vozdeystvij*" [Sensors, instruments and systems for aerospace instrumentation under thermal conditions], St. Petersburg, Russia.
3. Kochurina, E. S., Anchutin, S. A. and Kalugin, V. V. (2022), "Development of a sensitive element of a micromechanical accelerometer", *Izv. Vuzov. Elektronika*, vol. 27, no. 1, pp. 59-67.
4. Kostenko, V. D. and Barulina, M. A. (2023), "Toward the use of radio-resistant glass for the fabrication of a micromechanical accelerometer". *V sbornike: Mezhdunarodnyj seminar «Navigaciya i upravlenie dvizheniem» (NMC 2023)* [Proceedings of the 25th Conference of Young Scientists "Navigation and Motion Control"], Saint Petersburg, pp. 21-24.

5. Kostenko, V. D., Barulina, M. A. and Shcherbakov, A. V. (2023), "Prospects for glass micro-mechanical accelerometers for space satellites". *RusNanoSat-2023: Sbornik tezisev dokladov pyatogo rossijskogo simpoziuma po nanosputnikom s mezhdunarodnym uchastiem* [Proceedings of the 5th Russian symposium on nanosatellites with international participation], Samara, Russia, pp. 132-134.
6. GOST 23718-2014. Intergovernmental standard. Passenger and transporter airplanes and helicopters. Permissible vibration levels in cabins and cockpits and methods of vibration measurement. Replacing GOST 2371-93. Introduced – 2015-01-01, М: Standartinform 2019, p. 20.
7. Bezmozgij, I. M., Sofinskij, A. N. and Chernyagin, A. G. (2014). "Modeling in problems of vibration resistance of rocket-space structures". *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*, no. 3 (6), pp. 71-80.
8. Paing, S., Kalugin, V. and Kochurina, E. (2023), "Modeling and optimization of MEMS comb type capacitive acceleration sensor". *Proc. Univ. Electronics*, vol. 28, no. 4, pp. 452-460.
9. Topil'skij, V. B. (2012), "*Mikroelektronnye izmeritel'nye preobrazovateli: Ucheb. posobie*" [Microelectronic measuring transducers: textbook.]. М.: BINOM. Laboratoriya znaniy.
10. Tazhibayev, K. T., Tazhibayev, D. K. and Akmatallieva, M. S. (2018), "Identification of residual and acting stresses by polarization-acoustic method". *Mezhdunarodnyj zhurnal gumanitarnyh i estestvennyh nauk*, no. 4, pp. 134-139.
11. Birger, I. A. (1963), "*Ostatochnye napryazheniya*" [Residual stresses], Moscow, Russia.

Информация об авторах:

М. А. Барулина – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки - институт проблем точной механики и управления Российской Академии наук (410028, Россия, г. Саратов, ул. Рабочая, д. 24); директор физико-математического института Пермского государственного национального исследовательского университета (614068, Россия, г. Пермь, ул. Букирева, 15); Действительный член Российской академии космонавтики им. К.Э. Циолковского, Действительный член Академии навигации и управления движением РАН; AuthorID: 174006, ScopusID: 51161080800, ResearcherID: B-2919-2016;

А. В. Голиков – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки – институт проблем точной механики и управления Российской Академии наук (410028, Россия, г. Саратов, ул. Рабочая, д. 24), Член-корреспондент Российской академии космонавтики им. К.Э. Циолковского; AuthorID: 8708, ScopusID: 57213826231, ResearcherID: AAF-5651-2021;

Е. В. Панкратова – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки – институт проблем точной механики и управления Российской Академии наук (410028, Россия, г. Саратов, ул. Рабочая, д. 24); AuthorID: 909223, ScopusID: 57193550443, ResearcherID: ACY-2638-2022;

О. В. Маркелова – младший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки – институт проблем точной механики и управления Российской Академии наук, (410028, Россия, г. Саратов, ул. Рабочая, д. 24); AuthorID: 994464, ScopusID: 57215606494.

Information about the authors:

M. A. Barulina – Doctor of Science (Physics and Mathematics), Head of Laboratory, Precision Mechanics and Control Institute, Russian Academy of Sciences (24, Rabochaya St., Saratov, Russia, 410028), Director of the Institute of Physics and Mathematics, Perm State University, (15, Bukireva St., Perm, Russia, 614068), Full Member of the K.E. Tsiolkovsky Russian Academy of Cosmonautics, Full member of the Academy of Navigation and Motion Control of the Russian Academy of Sciences; AuthorID: 174006 ScopusID: 51161080800, ResearcherID: B-2919-2016;

A. V. Golikov – Ph.D. (Engineering Sciences), Leading Researcher, Precision Mechanics and Control Institute, Russian Academy of Sciences (24, Rabochaya St., Saratov, Russia, 410028), Corresponding Member of the K.E. Tsiolkovsky Russian Academy of Cosmonautics; AuthorID: 8708, ScopusID: 57213826231, ResearcherID: AAF-5651-2021;

E. V. Pankratova – Ph.D. (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Precision Mechanics and Control Institute, Russian Academy of Sciences (24, Rabochaya St., Saratov, Russia, 410028); AuthorID: 909223, ScopusID: 57193550443, ResearcherID: ACY-2638-2022;

O. V. Markelova – junior researcher, Precision Mechanics and Control Institute, Russian Academy of Sciences (24, Rabochaya St., Saratov, Russia, 410028); AuthorID: 994464, ScopusID: 57215606494.