

РЕФЕРАТ по НИОКР

Акселерометр, монокристаллический кремний, плавленный кварц, электроника возбуждения, инерционная масса, емкостный датчик линейного перемещения, мост Саути, ленточный карданный подвес, глубина волн гофров, металлизация, изгибающий и крутящий моменты, напряжения изгиба и кручения, нелинейность упругой характеристики.

Объектом исследования является прецизионный линейный акселерометр без обратной связи по силе, появляющейся при действии на инерционную массу ускорений.

Цель работы – исследование и разработка аналогового прецизионного акселерометра с ленточным карданным подвесом инерционной массы, выполненного из плавленного кварца, без обратной связи по силе, имеющего расширенный диапазон линейности упругой характеристики и на порядок меньшую цену по сравнению с наиболее точными акселерометрами с магнитоэлектрической обратной связью по силе.

Обоснована возможность повышения точности линейного акселерометра без силовой обратной связи, предложен надежный способ соединения деталей акселерометра из плавленного кварца, приведен расчет нелинейности упругой характеристики акселерометра и собственной частоты колебаний ленточного карданного подвеса, приведен расчет электрического нагревательного элемента (фена) для штампа горячей штамповки ленточного карданного подвеса акселерометра.

Основные конструктивные особенности акселерометра: рабочий участок ленточного карданного подвеса инерционной массы выполнен с волнами гофров в радиальном и окружном направлениях. Разработана конструкторская документация на акселерометр АКП1-1СБ, на штамп для горячего формообразования из ленты из плавленного кварца толщиной 20 мкм рабочего гофрированного участка карданного подвеса, произведен расчет электрического нагревательного элемента (фена) с максимальной температурой газа (азота) 1200°C и разработана конструкторская документация на фен ФП1-1СБ мощностью 150...200 Вт.

Материалы технического отчета и конструкторская документация на акселерометр АКП1-1СБ, штамп ША1-1СБ, фен ФП1-1СБ переданы научно-производственному предприятию ООО «ТАН-ИТ».

Конструкция акселерометра защищена патентами Российской Федерации № 2191390 «Акселерометр», 2002, Бюл. № 29 и № 2200807 «Гофрированная оболочка», 2003, Бюл. №8, патентообладатель, научный руководитель проекта № 3990 Увакин В.Ф.

Опубликована статья в журнале «Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика», № 6, с 33...37 Увакин В.Ф. «Об одной конструкции малогабаритного линейного акселерометра».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных теоретических исследований можно сделать следующие выводы:

1. Предложена новая конструкция электромеханической части прецизионного линейного акселерометра с ленточным карданным подвесом инерционной массы, выполненного из плавленного кварца, без обратной связи по силе, удовлетворяющего требованиям технического задания на акселерометр по проекту № 3990 (государственный контракт № 2105р), разработана техническая документация на электромеханическую часть акселерометра АКП1-1СБ.

2. Теоретически обоснована возможность получения точностных характеристик акселерометра, соответствующих классу точности измерительных преобразователей 0,05.

3. Монолитность конструкции электромеханической части акселерометра из плавленного кварца без концентраторов напряжений позволяет повысить надежность работы акселерометра, снизить погрешность измерения ускорений от гистерезиса упругой характеристики и температурную погрешность от изменения жесткости ленточного карданного подвеса до приведенных в техническом задании значений.

4. Приведен расчет электрического нагревательного элемента (фена) для штампа горячей штамповки волн гофров на рабочем участке ленточного карданного подвеса акселерометра, выполненного из плавленного кварца, коэффициент теплопередачи которого в 6,5 раза превышает коэффициент теплопередачи известных спиральных нагревательных элементов.

5. Разработана конструкторская документация на технологическую оснастку для изготовления ленточного карданного подвеса инерционной массы акселерометра: штамп для горячей штамповки гофров на карданном подвесе ША1-1СБ, фен ФП1-1СБ с максимальной рабочей температурой газа 1200°C.

6. Конструкция акселерометра АКП1-1СБ защищена патентами Российской Федерации № 2191390 «Акселерометр», 2002, Бюл. № 29 и № 2200807 «Гофрированная оболочка», 2003, Бюл. № 8, патентообладатель, научный руководитель проекта № 3990 Увакин В.Ф.

ВВЕДЕНИЕ

Основными требованиями к датчикам первичной информации систем навигации, ориентации и управления средней точности являются малые массогабаритные характеристики, низкие себестоимость и энергопотребление при высокой надежности в эксплуатации. Этим требованиям в значительной степени удовлетворяют микромеханические гироскопы и акселерометры, узлы которых формируются из неметаллических материалов (монокристаллического кремния, плавленого кварца, карбида кремния и др.) методами фотолитографии и изотропного или анизотропного травления вместе с элементами электроники возбуждения, датчиками съема и преобразования выходного сигнала, элементами формирования обратных связей.

Недостатками конструкций маятниковых линейных акселерометров и микромеханических вибрационных гироскопов, выполненных из монокристаллического кремния с использованием технологий, развитых в твердотельной микроэлектронике, являются [1]:

- наличие упругих подвесов (торсионов) для инерционной или пробной массы с малыми размерами в плане (десятые доли миллиметра) и толщиной $(8...20)10^{-6}$ м, которые являются концентраторами напряжений, особенно при высокой степени вертикальности стенок подвеса, снижающими надежность приборов в эксплуатации;

- высокая стоимость заготовок для деталей из монокристаллического кремния;

- низкая добротность осцилляторов (подвесов), обусловленная микроэлектронной технологией обработки заготовок из монокристаллического кремния ($Q < 50000$);

- низкие диэлектрические свойства, большая диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 12,5$, что приводит к снижению точностных характеристик емкостных преобразователей угловых перемещений инерционной (пробной) массы из-за влияния токов утечки и паразитных емкостей;

- увеличенные в плане размеры датчиков, выполненных по дифференциальной схеме, например, акселерометра разомкнутого типа на двух маятниковых подвесах [1].

В отличие от монокристаллического кремния плавленый кварц как конструкционный материал является более технологичным при переработке в изделия на машинах-автоматах, имеет температурный коэффициент линейного расширения $\alpha = 5 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$, низкий модуль упругости $E = 74,5 \text{ ГПа}$, малый температурный коэффициент модуля упругости $\beta_E = 71 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, высокие диэлектрические свойства: диэлектрическую проницаемость $\epsilon = 3,8$, большую электрическую прочность $E_{пр} = 44 \text{ МВ/м}$, достаточно высокий предел прочности на изгиб $\sigma_{и} = 110 \text{ МПа}$ (для прозрачного кварцевого стекла [2]), позволяет получать добротность резонаторов $Q = (5...9)10^6$ [1].

Снижение стоимости и повышение надежности в эксплуатации линейных кварцевых акселерометров средней точности возможно при существенном упрощении конструкции акселерометра с разомкнутой схемой измерения ускорений. Упругий подвес инерционной массы таких акселерометров должен иметь большой линейный участок упругой характеристики, наиболее нагруженные участки которого не должны иметь концентраторов напряжений, что можно обеспечить увеличением размеров в плане, толщины и повышением качества поверхностей этих участков подвеса при использовании технологичного способа получения таких подвесов горячей листовой штамповкой, например, из ленты из плавленого кварца заданной толщины.

I. ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ЛИНЕЙНОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА БЕЗ СИЛОВОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

Общий вид кварцевого акселерометра разомкнутого типа в разрезе представлен на рис.1. Корпус акселерометра выполнен из двух чашеобразных элементов 1 и 2, между которыми закреплен ленточный карданный подвес 3 по наружному кольцу. На внутреннем кольце карданного подвеса 3 симметрично с двух сторон установлены элементы 4 и 5, образующие инерционную массу акселерометра [3].

На наружных торцовых поверхностях А и Б элементов 4 и 5 инерционной массы и на внутренних донных поверхностях С и Д чашеобразных элементов 1 и 2 корпуса нанесены металлизацией электроды дифференциального емкостного преобразователя линейных перемещений инерционной массы, образующих емкости C_1 и C_2 . На внутренних торцовых поверхностях Л, М и Н, Р на участках малой толщины элементов 4 и 5 инерционной массы также напылением нанесены слои металла толщиной, равной толщине напыленных электродов на наружных торцовых поверхностях этих же элементов, которые соединены между собой симметрично расположенными по отношению к подвесу 3 напыленными токоподводами (на чертежах не показаны) с образованием общего подвижного электрода с выводом его на корпус. Это позволяет уменьшить прогиб тонкостенных подвижных электродов емкостного преобразователя за счет биметаллического эффекта, уменьшить температурную нестабильность емкостей C_1 и C_2 емкостного преобразователя линейных перемещений инерционной массы и масштабного коэффициента акселерометра.

Ленточный карданный подвес 3 инерционной массы акселерометра, представленный на рис.2, выполнен из наружного и внутреннего колец и внутренней рамки, зазор между которыми $\delta=(0,2...0,3)10^{-3}$ м. На участках внутренней рамки карданного подвеса между радиальными парами коротких ортогональных перемычек шириной b_p , соединяющих инерционную массу через внутреннюю рамку с корпусом акселерометра, в радиальном направлении выполнены волны гофров E пологого синусоидального профиля глубиной H_r , равной удвоенной амплитуде синусоиды и длиной волны l_r (Рис.3), а в окружном направлении волны гофров F с глубиной H_t и длиной волны $l_t=b$ (Рис.4). Они позволяют за счет уменьшения жесткости на растяжение гофрированных рабочих участков ленточного карданного подвеса и увеличения их изгибной жесткости на три-четыре порядка увеличить линейный участок упругой характеристики ленточного карданного подвеса и значительно увеличить динамический диапазон акселерометра [4].

Большая ширина внутренней рамки карданного подвеса $b=(1,0...1,5)10^{-3}$ м при малом наружном диаметре карданного подвеса $D_n=1,2\cdot 10^{-2}$ м, постоянная толщина ленточного карданного подвеса $h=(1...5)10^{-3}$ м позволяют исключить концентраторы напряжений на рабочих участках внутренней рамки карданного подвеса, упростить процесс выполнения симметрично напыленного токоподвода к подвижным электродам дифференциального емкостного датчика линейных перемещений инерционной массы акселерометра.

Ленточный карданный подвес 3 инерционной массы можно изготовить из ленты плавящего кварца заданной толщины и диаметра с предварительно полученными с помощью лазера прорезами шириной δ заданной конфигурации и последующей горячей формовкой в штампе волн гофров заданной глубины H_r и H_t в радиальном и окружном направлениях на участках внутренней рамки ленточного карданного подвеса.

Технологической особенностью конструкции акселерометра является также “холодная” сварка элементов корпуса 1 и 2 и элементов инерционной массы 4 и 5 с наружным и внутренним кольцами ленточного карданного подвеса 3. Сварка включает нанесение тончайших равномерных пленок двуокиси кремния на соединяемые поверхности и облучение мест соединения в специальных камерах инфракрасными лучами при температурах 150...250°C. Это позволяет резко снизить термоупругие напряжения в элементах конструкции, так как пленка клея не деформируется, обеспечить однородность среды на границах соединений, сохранить геометрию и обеспечить высокую прочность и стойкость к термодарам соединений деталей [5].

В качестве преобразователя измеряемого ускорения в пропорциональный электрический сигнал в акселерометре можно, например, использовать мост Саути (Рис.5) [6], в два смежных плеча которого включены емкости C_1 и C_2 дифференциального емкостного преобразователя линейных перемещений инерционной массы, а в два других – резисторы R . Одна из диагоналей моста должна быть подключена к высокостабильному высокочастотному источнику синусоидального напряжения U , а другая - к усилителю-преобразователю акселерометра 7. Действие ускорения a приводит к смещению инерционной массы акселерометра, изменению емкостей C_1 и C_2 на $\pm\Delta C$, которые преобразуются в напряжения постоянного тока $U_{\text{вых}}$ той или иной полярности, пропорциональное измеряемому ускорению a .

Для расчета ленточного карданного подвеса акселерометра с волнами гофров в радиальном и окружном направлениях на внутренней рамке можно воспользоваться методикой расчета прорезных пружин, изложенной в работе [7], поскольку при осевом нагружении их торцы перемещаются строго поступательно. Расчет прорезных пружин в работе [7] приведен без учета ширины и жесткости коротких пар перемычек при действии равномерно распределенной между перемычками осевой силы P .

Предполагая, что радиальные пары коротких ортогональных перемычек ленточного карданного подвеса являются абсолютно жесткими, можно в первом приближении принять в качестве исходной расчетную схему одного из деформируемых плоских колец прорезной пружины из изотропного материала с шириной кольца равной ширине b внутренней рамки карданного подвеса и средним радиусом кольца $R_{\text{ср}}$. Последний определяется с учетом ширины четырех коротких и жестких на изгиб и кручение перемычек длиной δ и шириной $b_{\text{п}}$ соотношением

$$R_{\text{ср}} = \frac{l_{\delta\text{н}} + l_{\delta\text{г}}}{4\pi},$$

где $l_{\text{дн}}$, $l_{\text{дв}}$ - длины наружной и внутренней прорезей рамки карданного подвеса с шириной рамки b .

В произвольном сечении φ внутренней рамки ленточного плоского карданного подвеса, имеющего число прорезей по двум ортогональным осям $n=2$ и центральный угол α , соответствующий каждой прорези равный π , изгибающий момент $M_{\text{и}}(\varphi)$ и крутящий $M_{\text{к}}(\varphi)$ соответственно равны [7]:

$$M_{\text{и}}(\varphi) = \frac{PR_{\text{ср}}}{4} (1 - \chi)(\cos\varphi - \sin\varphi); \quad (1)$$

$$M_{\text{к}}(\varphi) = \frac{PR_{\text{ср}}}{4} [(1 - \chi)(\sin\varphi + \cos\varphi) - 1], \quad (2)$$

где φ - угол между осью перемишки и произвольным сечением;
 χ - безразмерный коэффициент, определяемый по формуле:

$$\chi = 1 - \frac{2\nu}{\nu - 1 + \frac{\pi}{2}(\nu + 1)}; \quad \nu = \frac{EJ_x}{GJ_p}, \quad (3)$$

E , G - модули упругости первого и второго рода для изотропного материала плоского ленточного подвеса соответственно; $J_x = \frac{bh^3}{12}$ - момент инерции сечения кольца относительно главной центральной оси; J_p - полярный момент инерции сечения кольца.

Изгибающий и крутящий моменты достигают наибольшей величины в сечениях, граничащих с перемишками, то есть при $\varphi=0$ и при $\varphi=\pi/2$. Из уравнений (1), (2) определим модули максимальных изгибающих $|M_{\text{и max}}|$ и крутящих $|M_{\text{к max}}|$ моментов

$$|M_{\text{и max}}| = \frac{PR_{\text{ср}}}{4} (1 - \chi); \quad (4)$$

$$|M_{\text{к max}}| = \frac{PR_{\text{ср}}}{4} \chi. \quad (5)$$

Осевое перемещение λ внутреннего кольца ленточного карданного подвеса равно [7]

$$\lambda = \frac{6\gamma PR_{\text{ср}}^3}{Ebh^3}, \quad (6)$$

где безразмерный коэффициент γ равен

$$\gamma = \nu \left[\frac{\pi}{4} - \frac{2\nu}{(\nu - 1) + \frac{\pi}{2}(\nu + 1)} \right].$$

Жесткость ленточного карданного подвеса по силе K_p равна

$$K_p = \frac{P}{\lambda} = \frac{Eb}{6\gamma} \left(\frac{h}{R_{cp}} \right)^3 \quad (7)$$

Следует иметь в виду, что формула (7) справедлива только для малых перемещений λ внутреннего кольца карданного подвеса. С увеличением λ возрастают нелинейность упругой характеристики карданного подвеса и его жесткость K_p , что связано с растяжением внутренней рамки карданного подвеса при приложении осевой силы P .

Наибольшие напряжения изгиба и кручения с учетом соотношения (4), (5) соответственно равны [7]

$$\sigma_{и max} = \frac{6M_{и max}}{bh^2} = \frac{3(1-\chi)}{2} \cdot \frac{PR_{cp}}{bh^2}; \quad (8)$$

$$\tau_{к max} = \frac{M_{к max}}{\psi bh^2} = \frac{\chi PR_{cp}}{4\psi bh^2}, \quad (9)$$

где ψ - безразмерный коэффициент, зависящий от отношения сторон прямоугольного сечения внутренней рамки карданного подвеса h/b [8].

Значения безразмерных коэффициентов χ , ν , γ , Ψ в зависимости от отношения размеров сечения рамки h/b при коэффициенте Пуассона $\mu=0,3$ приведены в табл. [7, 8].

Величина напряжения растяжения σ_p в сечении внутренней рамки пропорциональна относительной деформации рамки ϵ_p и модулю упругости материала рамки E и при больших деформациях может превысить напряжения изгиба $\sigma_{и}$ и кручения $\tau_{к}$.

Таблица

Коэффициенты ν , χ , γ , Ψ для расчета внутренней рамки карданного подвеса прямоугольного сечения

Коэффициенты	Отношение h/b					
	0	0,10	0,25	0,50	0,66	1,00
ν	0,65	0,69	0,77	0,95	1,10	1,54
χ	0,42	0,41	0,40	0,37	0,35	0,32
γ	0,133	0,135	0,140	0,146	0,151	0,161
ψ	0,333	0,313	0,282	0,246	0,231	0,208

Покажем, что выполнение на рабочих участках внутренней рамки ленточного карданного подвеса волн гофров в окружном и радиальном направлениях с параметрами волн гофров H_t , l_t и H_r , l_r соответственно, позволит резко

уменьшить напряжения растяжения σ_r при заданной величине относительной деформации ε_r , увеличить изгибную жесткость и уменьшить жесткость на кручение ленточного карданного подвеса.

При расчете упругой характеристики ленточного карданного подвеса инерционной массы акселерометра с волнами гофров в окружном и радиальном направлениях на внутренней рамке подвеса будем рассматривать рабочие участки внутренней рамки как плоские анизотропные секторные пластины. При этом толщину анизотропной пластины примем равной толщине внутренней рамки карданного подвеса, что позволит получить материал для расчета в наиболее простой аналитической форме.

Таким образом, материал эквивалентной плоской кольцевой секторной пластины должен обладать тройной анизотропией: в одном и том же направлении модули упругости материала при растяжении, изгибе и кручении должны быть различными.

Упругие коэффициенты материала анизотропных секторных пластин толщиной h можно определить из равенства жесткостей на растяжение, изгиб и кручение элементов анизотропных секторных пластин, соответствующим жесткостям гофрированных рабочих участков ленточного карданного подвеса.

Введем обозначения: E_{rp} , E_{tp} и E_{ru} , E_{tu} – приведенные значения модулей упругости первого рода, характеризующие жесткости материала анизотропных секторных пластин рабочих участков карданного подвеса на растяжение, изгиб в радиальном и окружном направлениях; G_{rk} , G_{tk} – приведенные значения модулей упругости второго рода анизотропных секторных пластин при кручении в радиальном и окружном направлениях, значения которых можно представить в следующем виде [9]

$$\begin{aligned} E_{rp} &= \frac{k_{1t}E}{k_{rp}}; & E_{tp} &= \frac{k_{1r}E}{k_{tp}}; & E_{ru} &= \frac{k_{tp}E}{k_{1r}}; & E_{tu} &= \frac{k_{rp}E}{k_{1t}}; \\ G_{rk} &= \frac{k_{1r}E}{2(1+\mu)k_{tp}}; & G_{tk} &= \frac{k_{1t}E}{2(1+\mu)k_{rp}}, \end{aligned} \quad (10)$$

где коэффициенты анизотропии $k_{ij} > 1$.

Коэффициенты k_{1r} , k_{1t} определяются отношением длин дуг одной волны гофров S_r , S_t в радиальном и окружном направлениях к длинам волн гофров l_r и l_t (рис.3, 4) в каждом из направлений и находятся в пределах 1,1...1,4. Коэффициенты k_{rp} , k_{tp} , равные отношению моментов инерции окружного и радиального сечений гофрированной и плоской части внутренней рамки карданного подвеса, быстро возрастают с увеличением глубины волн гофров H_r и H_t (рис.3,4) и могут быть значительно больше единицы [4].

Коэффициенты k_{rp} и k_{tp} слабо зависят от длин волн гофров [4], поэтому в качестве расчетной длины волн гофров в радиальном направлении можно принять ее среднее значение по среднему радиусу кольца R_{cp} .

Коэффициенты анизотропии по каждому из двух ортогональных направлений волн гофров k_{1r} , k_{1t} , k_{rp} , k_{tp} рабочих участков внутреннего кольца ленточ-

ного карданного подвеса определяются через полные эллиптические интегралы I и II рода по следующим соотношениям [4]:

$$k_{1r} = \frac{2}{\pi\sqrt{1-a_t^2}} E_{ot}; \quad (11)$$

$$k_{1t} = \frac{2}{\pi\sqrt{1-a_r^2}} E_{or}; \quad (12)$$

$$k_{rp} = \frac{H_t^2}{h^2} \frac{2}{\pi\sqrt{1-a_t^2}} \left[\left(\frac{1}{a_t^2} - 1 \right) F_{ot} + \left(2 - \frac{1}{a_t^2} \right) E_{ot} \right] + \frac{2\sqrt{1-a_t^2}}{\pi} F_{ot}; \quad (13)$$

$$k_{tp} = \frac{H_r^2}{h^2} \frac{2}{\pi\sqrt{1-a_r^2}} \left[\left(\frac{1}{a_r^2} - 1 \right) F_{or} + \left(2 - \frac{1}{a_r^2} \right) E_{or} \right] + \frac{2\sqrt{1-a_r^2}}{\pi} F_{or}; \quad (14)$$

где $F_{or} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\alpha_t}{\sqrt{1-a_t^2 \sin^2 \alpha_t}}$; $F_{ot} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\alpha_r}{\sqrt{1-a_r^2 \sin^2 \alpha_r}}$ - полные эллиптические

интегралы I рода для волн гофров в окружном и радиальном направлениях соответственно;

$E_{or} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1-a_t^2 \sin^2 \alpha_t} d\alpha_t$; $E_{ot} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1-a_r^2 \sin^2 \alpha_r} d\alpha_r$ - полные эллиптические

интегралы II рода для волн гофров в окружном и радиальном направлениях соответственно;

$$a_r = \frac{\frac{\pi H_r}{l_r}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\pi H_r}{l_r} \right)^2}}; \quad a_t = \frac{\frac{\pi H_t}{l_t}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\pi H_t}{l_t} \right)^2}} \quad \text{- модули полных эллиптических}$$

интегралов I и II рода для волн гофров в радиальном и окружном направлениях;

$$\alpha_r = 2\pi \frac{x_r}{l_r}; \quad \alpha_t = 2\pi \frac{x_t}{l_t} \quad \text{- аргументы для волн гофров в радиальном и окружном направлениях; } x_r, x_t \text{ - текущие координаты для синусоиды волн гофров}$$

в радиальном и окружном направлениях.

Полные эллиптические интегралы I и II рода для волн гофров по двум ортогональным направлениям можно представить в виде рядов [10]

$$F_0 = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\alpha}{\sqrt{1-a^2 \sin^2 \alpha}} = \frac{\pi}{2} \left[1 + \left(\frac{1}{2} \right)^2 a^2 + \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{3}{4} \right)^2 a^4 + \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{3}{4} \cdot \frac{5}{6} \right)^2 a^6 + \dots \right]; \quad (15)$$

$$E_0 = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1-a^2 \sin^2 \alpha} d\alpha = \frac{\pi}{2} \left[1 - \left(\frac{1}{2} \right)^2 a^2 - \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{3}{4} \right)^2 \frac{a^4}{3} - \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{3}{4} \cdot \frac{5}{6} \right)^2 \frac{a^6}{5} \dots \right] \quad (16)$$

Подставив значения полных эллиптических интегралов (15), (16) в выражения (11), (12), (13) и (14), получим

$$k_{1r} = \frac{1}{\sqrt{1-a_t^2}} \left[1 - \frac{a_t^2}{4} - \frac{3a_t^4}{64} - \frac{45a_t^6}{2304} - \dots \right]; \quad (17)$$

$$k_{1t} = \frac{1}{\sqrt{1-a_r^2}} \left[1 - \frac{a_r^2}{4} - \frac{3a_r^4}{64} - \frac{45a_r^6}{2304} - \dots \right]; \quad (18)$$

$$k_{rp} = \frac{3H_t^2}{2h^2} \frac{1}{\sqrt{1-a_t^2}} \left(1 - 0,375a_t^2 - 0,078a_t^4 - 0,091a_t^6 \right) + \sqrt{1-a_t^2} \left(1 + 0,25a_t^2 + 0,14a_t^4 + 0,097a_t^6 \right) \quad (19)$$

$$k_{tp} = \frac{3H_r^2}{2h^2} \frac{1}{\sqrt{1-a_r^2}} \left(1 - 0,375a_r^2 - 0,078a_r^4 - 0,091a_r^6 \right) + \sqrt{1-a_r^2} \left(1 + 0,25a_r^2 + 0,14a_r^4 + 0,097a_r^6 \right) \quad (20)$$

Для определения жесткости гофрированных участков карданного подвеса на кручение найдем составляющие податливости участков подвеса на кручение в радиальном q_{rk} и окружном q_{tk} направлениях

$$q_{rk} = \frac{1}{G_{rk}} = \frac{2(1+\mu)k_{tp}}{k_{1r}E}; \quad q_{tk} = \frac{1}{G_{tk}} = \frac{2(1+\mu)k_{rp}}{k_{1t}E}; \quad (21)$$

Суммарная податливость гофрированных рабочих участков карданного подвеса на кручение равна

$$q_k = \sqrt{q_{rk}^2 + q_{tk}^2} = \frac{2(1+\mu)}{E} \frac{k_{tp}}{k_{1r}} \sqrt{1 + \left(\frac{k_{rp}k_{1r}}{k_{1t}k_{tp}} \right)^2} \quad (22)$$

Эквивалентное значение модуля упругости анизотропных секторных пластин толщиной h на кручение определяется по формуле

$$G_k = \frac{1}{q_k} = \frac{E}{2(1+\mu) \frac{k_{tp}}{k_{1r}} \sqrt{1 + \left(\frac{k_{rp}k_{1r}}{k_{1t}k_{tp}} \right)^2}} \quad (23)$$

Параметры ленточного карданного подвеса толщиной $h=0,02$ мм по конструктивным соображениям и условиям технологичности выбираем следующими: глубина волн гофров на рабочих участках подвеса в радиальном направлении $h_r=20h=0,4$ мм, длина волны гофров $l_r=2,7$ мм (две волны на рабочем участ-

ке) и в окружном направлении $H_t=10h=0,2$ мм, длина одной волны гофров $l_r=b=1$ мм.

В этом случае коэффициенты анизотропии для рабочих участков в виде пластин, определенные по формулам (17),... (20), будут равны: $k_{lr}=1,02$; $k_{lt}=1,05$; $k_{rp}=146$; $k_{rp}=617$.

Отношение коэффициентов анизотропии k_{rp}/k_{lr} в формуле (23) для выбранного ленточного карданного подвеса из ленты толщиной $h=0,02$ мм составляет 605, во столько же раз уменьшится модуль упругости при кручении G_k , что при заданном линейном перемещении инерционной массы λ_m позволит снизить касательные напряжения на рабочих участках гофрированного карданного подвеса во столько же раз. Поэтому влиянием касательных напряжений на жесткость и линейность упругой характеристики ленточного гофрированного карданного подвеса при дальнейшем анализе пренебрегаем.

Увеличение изгибной жесткости гофрированного ленточного карданного подвеса в k_{rp}/k_{lt} раз можно рассматривать как жесткость плоского карданного подвеса из изотропного материала с большей толщиной ленты

$$h_3 = 3 \sqrt{\frac{k_{rp}}{k_{lt}}} h = 0,103 \text{ мм.}$$

Наибольшее напряжение изгиба $\sigma_{иг max}$ в карданном подвесе с гофрированной внутренней рамкой в первом приближении можно определить по формуле для плоского подвеса толщиной h_3 из изотропного материала при $P_{max}=0,08H$ (что соответствует ускорению $a=40g$).

$$\sigma_{иг max} = \frac{3(1-\chi)}{2} \cdot \frac{P_{max} R_{cp}}{bh_3^2} = 23,6 \text{ МПа} ; \quad (24)$$

Максимальное напряжение изгиба $\sigma_{и в max}$ на вершинах волн гофров в окружном направлении с глубиной $H_t=10h$ равны

$$\sigma_{и в max} = \sigma_{иг max} \frac{H_t}{h_3} = 23,6 \frac{10h}{5,17h} = 45,6 \text{ МПа}$$

Для плавленого кварца предел прочности на изгиб $\sigma_{и}=110$ МПа, коэффициент запаса по пределу прочности на изгиб $n_{и}=2,4$.

Жесткость ленточного карданного подвеса с волнами гофров на рабочих участках глубиной H_r в радиальном направлении и H_t в окружном направлении по силе $P_{рг}$ равна

$$k_{pz} = \frac{k_{rp} Eb \left(\frac{h}{R_{cp}} \right)^3}{6k_{lt} \gamma} = 1300 \frac{H}{m} \quad (25)$$

Максимальная осевая деформация λ_{rmax} ленточного гофрированного карданного подвеса, соответствующая ускорению $a_{max}=40g$ при эквивалентной инерционной массе $m_u=2 \cdot 10^{-4}$ кг

$$\lambda_{rmax} = m_u \cdot a_{max} / k_{pz} = 6,15 \cdot 10^{-5} \text{ м} \quad (26)$$

На заделанных по концам рабочих участках внутренней гофрированной рамки карданного подвеса длиной $l_{\Pi} = \pi R_{\text{ср}} / 2$ действие по оси подвеса силы P_{max} сопровождается деформацией подвеса $\lambda_{\Gamma \text{max}} = k_{1t} \cdot \lambda_{\text{max}}$, удлинением нейтрального сечения рабочих участков внутренней рамки и появлением напряжения растяжения $\sigma_{p \text{ max}}$, пропорционального относительно удлинению нейтральной линии ε_{max} , которое в первом приближении равно [9]

$$\varepsilon_{\text{max}} = \frac{\sqrt{l_{\Pi}^2 + \lambda_{\text{max}}^2 k_{1t}^2} - l_{\Pi}}{l_{\Pi}} = 6,61 \cdot 10^{-5} \quad (27)$$

Максимальное значение напряжения растяжения $\sigma_{tp \text{ max}}$ в анизотропных секторных кольцевых пластинках, соответствующих рабочим участкам внутренней рамки ленточного карданного подвеса можно определить по формуле

$$\sigma_{tp \text{ max}} = E_{tp} \cdot \varepsilon_{\text{max}} = \frac{k_{1r}}{k_{tp}} E_{\text{кв}} \cdot \varepsilon_{\text{max}} = 8,14 \cdot 10^{-3} \text{ МПа} \quad (28)$$

Пренебрегая влиянием напряжений кручения, которые действуют в ортогональной плоскости по отношению к изгибающим напряжениям и снижены в рабочих участках карданного подвеса в k_{rp}/k_{1t} , максимальное значение нелинейности упругой характеристики ленточного карданного подвеса с гофрами на рабочих участках внутренней рамки подвеса в первом приближении можно определить по формуле [11]

$$\gamma_{n \text{ max}} = \frac{2\sigma_{tp \text{ max}}}{\sigma_{из \text{ max}}} = 7 \cdot 10^{-4} = 0,07\% \quad (29)$$

Коэффициент нелинейности упругой характеристики карданного подвеса с гофрированной внутренней рамкой в диапазоне ускорений до 40g $\gamma_{нг} = 0,07\%$, в то время как для негофрированной внутренней рамки подвеса $\gamma_{н} = 37\%$, а в диапазоне измеряемых ускорений до 12 g коэффициент нелинейности упругой характеристики не превысит 0,01 %.

Собственная частота колебаний ленточного карданного подвеса с эквивалентной инерционной массой $m_{иэ} = 2 \cdot 10^{-4}$ равна [11]

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{\frac{m_{иэ}}{K_{p\Gamma}}}} = 407 \text{ Гц} \quad (30)$$

Температурная погрешность масштабного коэффициента акселерометра Δa_t , выполненного из плавленого кварца ($\beta E_{\text{кв}} = 71 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$)

$$\Delta a_t = \beta E_{\text{кв}} = 7,1 \cdot 10^{-3} \% \text{ К}^{-1} \quad (31)$$

Для уменьшения этой погрешности при работе акселерометра в широком интервале температур (-60...+60°C) можно ввести термостабилизацию прибора.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Предложена и теоретически исследована простая конструкция малогабаритного акселерометра разомкнутого типа, электромеханическая часть которого, состоящая только из трех различных деталей удовлетворяет основным принципам конструирования: симметрии и цельности конструкции, отсутствием концентраторов напряжений, технологичностью изготовления деталей и сборки.

2. Монолитность конструкции из плавленного кварца позволяет снизить погрешность измерения ускорения от гистерезиса упругой характеристики на 2-3 порядка, а температурную погрешность от изменения жесткости подвеса по сравнению с подвесом из металла уменьшить в 4-5 раз.

3. По величине нелинейности упругой характеристики карданного подвеса предлагаемый акселерометр в зависимости от диапазона измеряемых ускорений удовлетворяет классам точности измерительных преобразователей 0,01...0,05.

Техническое задание на акселерометр приведено в приложении 1. Конструкторская документация на предлагаемый кварцевый акселерометр АКП1-1СБ приведена в приложении 2. Конструкторская документация на штамп для горячей штамповки волн гофров на карданном подвесе акселерометра ША1-1СБ приведена в приложении 3.

II. РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАГРЕВАТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА (ФЕНА) ДЛЯ ШТАМПА ГОРЯЧЕЙ ШТАМПОВКИ ЛЕНТОЧНОГО КАРДАННОГО ПОДВЕСА АКСЕЛЕРОМЕТРА

Конструктивно нагревательный элемент (НЭ) выполнен в виде цилиндрической спирали из ленты нихрома марки Х20Н80-Н ГОСТ 12766.2-77 толщиной $h_n = 0,25$ мм, гофрированной по двум ортогональным направлениям (ГО) с глубиной волн гофров в продольном направлении $H_{np} = 0,6$ мм, длиной волны гофров $l_{np} = 2$ мм, длиной дуги волны гофров $S_{np} = \kappa_{1n} \cdot l_{np} = 2,36$ мм ($\kappa_{1n} = 1,18$ – коэффициент анизотропии ГО в поперечном направлении и

$$\kappa_{2np} = \frac{3}{2} \left(\frac{H_{np}}{h_n} \right)^2 + 1 = 12; \quad h_z - \text{средняя толщина ГО с глубиной волн гофров в}$$

поперечном направлении $H_n = 1$ мм, длиной волны гофров $l_n = 4$ мм, длиной дуги волны гофров $S_n = \kappa_{1np} \cdot l_n = 4,48$ мм ($\kappa_{1np} = 1,12$ – коэффициент анизотропии ГО в

продольном направлении) и $\kappa_{2n} = \frac{3}{2} \left(\frac{H_n}{h_n} \right)^2 + 1 = 32$ – коэффициент анизотропии ГО в поперечном направлении [12].

Приведенные значения модулей упругости эквивалентных по жесткостям на растяжение и изгиб плоских оболочек по продольной и поперечной осям в первом приближении будут соответственно равны [12]:

$$E_{np.p} = \frac{E}{\kappa_{2n}}; \quad E_{n.p.} = \frac{E}{\kappa_{2np}}; \quad (32)$$

$$E_{np.u} = \kappa_{2np} \cdot E; \quad E_{n.u} = \kappa_{2n} \cdot E, \quad (33)$$

где E – модуль упругости материала НЭ.

Уменьшение модулей упругости на растяжение по двум ортогональным осям $E_{np.p}$ и $E_{n.p.}$ ГО приводит к уменьшению температурных напряжений в местах соединения оболочки с каркасом НЭ, выполненного из материала с другим температурным коэффициентом линейного расширения по сравнению с материалом НЭ. В то же время приведенные значения модулей упругости ГО на изгиб по сравнению с плоской пластиной той же толщины h_n , $E_{np.u}$ и $E_{n.u}$ увеличатся в 12 и 32 раза соответственно, что уменьшает температурный прогиб НЭ по двум ортогональным осям и позволяет поднять допустимую температуру для НЭ заданной толщины на 150 - 250°C по сравнению с допустимым значением температуры для материала НЭ, например, для сплава Х20Н80-Н – 950...1200°C.

Для уменьшения коррозии материала НЭ при высоких температурах на поверхность НЭ следует нанести жаростойкое покрытие, например, хромовое с добавлением в электролит мельчайших алмазных частиц с размерами 40...60 ангстрем, температура плавления которых $t_{пл.а} = 3500^\circ\text{C}$, температура

плавления хрома $t_{пл.хр}=1900^{\circ}\text{C}$, которые обладают высокой теплопроводностью [13].

Другим способом нанесения жаростойкого покрытия, например, керамического с содержанием оксида алюминия 90-96%, рабочая температура которого $t_{рmax} = 1600^{\circ}\text{C}$, предел прочности на растяжение $\sigma_{вр} = 70...190$ МПа, теплопроводность $\lambda = 12...25$ Вт/м $^{\circ}\text{C}$ является холодный газодинамический метод, который позволяет формировать на различных подложках как любые металлические, так и неметаллические композиционные покрытия, например, из карбидов, боридов, оксидов, силицидов и других тугоплавких соединений [14].

Для дальнейшего увеличения рабочей температуры инертных газов, проходящих через фен, в качестве материала НЭ можно использовать молибденовую или вольфрамную ленту толщиной $h=0,05...0,3$ мм, гофрированную по двум ортогональным направлениям с покрытием, полученным путем силицирования в порошковой смеси, жаростойкость которого $1600...1700^{\circ}\text{C}$ [15].

Проведем сравнительный анализ эффективности теплообмена НЭ, выполненного в виде цилиндрической спирали из плоской полоски шириной $b_{нэ}=2$ мм, намотанной на каркас НЭ, длиной $L_{нэ}=1340$ мм с расстоянием между наружной поверхностью НЭ и внутренней поверхностью каркаса фена $\delta=1$ мм и НЭ той же ширины и длины, выполненного из ГО с параметрами волн гофров, приведенными ранее.

Выберем расчетную схему для плоского НЭ в виде плоской щели, эквивалентный диаметр для которой $d_{щ} = 2\delta = 2$ мм, а число Нуссельта $Nu_{щ} = 4,86$ [16].

При течении теплоносителя (газа) между двумя неограниченными пластинами при одностороннем обогреве и температуре НЭ $t_{нэ} = \text{const} = 1300^{\circ}\text{C}$ среднее значение коэффициента теплоотдачи НЭ – газ $\alpha_{в}$ и температуре воздуха на входе в фен $t_{во} = 20^{\circ}\text{C}$, коэффициенте теплопроводности воздуха при средней температуре $t_{вр} = 0,5(t_{нэ} + t_{во}) = 660^{\circ}\text{C}$ $\lambda_{вр} = 6,5 \cdot 10^{-2}$ Вт/м $^{\circ}\text{C}$ равно [16]

$$\alpha_{вщ} = \frac{Nu_{щ} \lambda_{вр}}{d_{щ}} = 158 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C}} \quad (34)$$

При двустороннем обогреве воздуха в щели поверхность теплообмена $F_{птщ}$ с учетом того, что наружная поверхность каркаса НЭ также будет иметь температуру, близкую к $t_{нэ}$, а температура внутренней поверхности корпуса фена в силу малого значения δ и передачи тепла от НЭ к внутренней поверхности корпуса фена излучением будет близка к $t_{нэ}$ и будет в первом приближении равна

$$F_{птщ} = 2 \cdot b_{нэ} L_{нэ} = 5,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

Удельная мощность теплоотдачи НЭ –воздух $P_{уд.щ}$ равна

$$P_{уд.щ} = \alpha_{вщ} F_{птщ} = 0,85 \text{ Вт/}^{\circ}\text{C}$$

Максимальная мощность теплопередачи НЭ –воздух при $t_{нэ} = 1300^{\circ}\text{C}$ и средней температуре воздуха $t_{в.ср} = 1200^{\circ}\text{C}$ составит

$$P_{нэщ} = P_{уд.щ} (t_{нэ} - t_{в.ср}) = 85 \text{ Вт}$$

Для определения теплоотдачи НЭ, выполненного из гофрированной по двум ортогональным направлениям оболочки шириной НЭ $b=2$ мм, длиной $L=1340$ мм с приведенными выше параметрами волн гофров с глубинами $H_{пр}=0,6$ мм и $H_{п}=1$ мм, длинами волн гофров $l_{пр}=2$ мм и $l_{п}=4$ мм, расстоянием

между стенками кольцевого канала для теплоносителя, в котором размещен НЭ $a=1,9$ мм, можно воспользоваться эквивалентной схемой обтекания теплоносителем шахматного пучка труб с эквивалентным диаметром труб $d_{\text{этр.}}=0,70$ мм, расстоянием между трубами в горизонтальной плоскости $S_1=1$ мм и расстоянием между смежными рядами труб $S_2=1,35$ мм с близкой по конфигурации схемой распределения потока на одном шаге гофров S_1 .

Задаваясь максимальным значением мощности теплового потока фена $P_{\text{max}}=200$ Вт, определим расход воздуха, приведенного к нормальным условиям и средней удельной теплоемкости воздуха $C_{\text{в.ср}}=1,115 \cdot 10^3$ Дж/кг $^\circ$ С, рабочей температуре воздуха в фене $t_{\text{вр}}=1200^\circ$ С

$$q_{\text{во}} = \frac{P_{\text{max}}}{C_{\text{в.ср}}(t_{\text{вр}} - t_{\text{во}})} = 1,52 \cdot 10^{-4} \frac{\text{М}^3}{\text{с}}. \quad (35)$$

Максимальное значение скорости воздуха $V_{\text{в.маx}}$ в узком сечении канала теплообменника фена с площадью $F_{\text{в.миn}}=1,8 \cdot 10^{-5}$ м 2 равно

$$V_{\text{в.маx}} = \frac{q_{\text{во}}}{F_{\text{в.миn}}} = 8,4 \text{ М} / \text{с}. \quad (36)$$

Число Рейнольдса для потока воздуха определяется по формуле

$$Re_{\text{в}} = \frac{V_{\text{в.маx}} \cdot d_{\text{э.мп}}}{\nu_{\text{вр}}}, \quad (37)$$

где $V_{\text{в.маx}}$ – скорость газа в узком сечении, м/с; $\nu_{\text{вр}}=1,51 \cdot 10^{-5}$ м 2 /с – кинематическая вязкость воздуха при температуре воздуха $t_{\text{во}}=20^\circ$ С.

Подставляя значения параметров в формулу (37), получим значение числа Рейнольдса $Re_{\text{в}}=389$, которое удовлетворяет условию $Re_{\text{в}} < 10^3$ (поток воздуха ламинарный).

Число Нуссельта для воздуха при $Re_{\text{в}} < 10^3$ для шахматного пучка труб равно [16]

$$Nu_{\text{в}}=0,49 Re_{\text{в}}^{0,5}=9,66 \quad (38)$$

Среднее значение коэффициента теплоотдачи НЭ – воздух $\alpha_{\text{в}}$ при коэффициенте теплопроводности воздуха при температуре $t_{\text{в}}=660^\circ$ С $\lambda_{\text{во}}=6,5 \cdot 10^{-2}$ Вт/м $^\circ$ С равно

$$\alpha_{\text{в2}} = Nu_{\text{в}} \cdot \frac{\lambda_{\text{во}}}{d_{\text{э.мп}}} = 897 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{С}}. \quad (39)$$

Поверхность теплообмена ленточного гофрированного НЭ шириной $b_{\text{нэ}}=S_{\text{пр}}=2,36$ мм, длиной $L_{\text{нэ}}=1340$ мм с учетом того, что температура наружной поверхности каркаса и внутренней поверхности корпуса НЭ будут близки к температуре НЭ за счет передачи тепла от последнего излучением, будет равна

$$F_{\text{пт.г}}=2 \cdot b_{\text{нэ}} \cdot L_{\text{нэ}}=6,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

Удельную мощность теплоотдачи НЭ – воздух можно определить по следующему соотношению

$$P_{\text{уд. вг}}=\alpha_{\text{в.г}} \cdot F_{\text{пт.г}}=5,6 \text{ Вт/}^\circ\text{С}.$$

Максимальная мощность теплоотдачи НЭ – воздух при $t_{нэ}=1300^{\circ}\text{C}$ и средней температуре воздуха $t_{в\text{ ср}}=1200^{\circ}\text{C}$ составит

$$P_{нэ.г}=P_{уд. в.г.}(t_{нэ}-t_{в\text{ ср}})=560 \text{ Вт}$$

Из приведенного анализа видно, что максимальная мощность теплоотдачи НЭ – воздух для гофрированного ленточного НЭ, выполненного по патенту РФ №220080 в 6,5 раза больше, чем известного ленточного спирального нагревателя при тех же его габаритах и массе.

Определим потери теплоты через двухслойную стенку фена с воздушной прослойкой по формуле [17]

$$Q_n = \frac{t_{вн} - t_{нар}}{\frac{1}{\alpha_{вн}F_{вн}} + \frac{\delta_k}{\lambda_k F_{рк}} + \frac{\delta_в}{\lambda_в F_{рв}} + \frac{\delta_э}{\lambda_э F_{рэ}} + \frac{1}{\alpha_{нар}F_{нар}}}, \quad (40)$$

где $t_{вн}$, $t_{нар}$ – температуры сред, омывающих внутреннюю и наружную поверхности фена; $\alpha_{вн}$, $\alpha_{нар}$ – средние коэффициенты теплоотдачи на внутренней и наружной поверхностях фена; $F_{вн}$, $F_{нар}$ – площади внутренней и наружной поверхности фена; δ_k , $\delta_в$, $\delta_э$ – толщина корпуса НЭ, воздушной прослойки и теплового экрана; λ_k , $\lambda_в$, $\lambda_э$ – средние коэффициенты теплопроводности материалов корпуса, воздуха и теплового экрана; $F_{рк}$, $F_{рв}$, $F_{рэ}$ – площади расчетных поверхностей корпуса НЭ, воздушной прослойки и теплового экрана соответственно, равные $F_{рк}=0,5(F_{вн} + F_{нк})$; $F_{рв}=0,5(F_{нк} + F_{вн.э})$; $F_{рэ}=0,5(F_{вн.э} + F_{н.э})$ при $F_{i+1}/F_i < 2$.

Принимаем температуру среды, омывающей внутреннюю поверхность НЭ $t_{вн} = 1200^{\circ}\text{C}$, температуру среды, омывающей наружную поверхность фена $t_{нар} = 20^{\circ}\text{C}$.

Для определения коэффициента теплоотдачи внутренней поверхности корпуса фена $\alpha_{вн} = \alpha_{изл} + \alpha_{конв}$ для газообразной внутренней среды (воздуха) рекомендуется выражение [17]:

$$\alpha_{вн.г} = \frac{4,54[(T_{вн}/100)^4 - (T_{см}/100)^4]}{t_{вн} - t_{см}} + 2,56\sqrt{t_{вн} - t_{см}} = 552 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C}}, \quad (41)$$

где $t_{см} = 1150^{\circ}\text{C}$ – температура внутренней поверхности корпуса НЭ.

Коэффициент теплоотдачи наружной поверхности фена для воздуха $\alpha_{нар.в}$ определим из табл. 6.3 [17] при температуре окружающего воздуха $t_в = 20^{\circ}\text{C}$ и $t_{нар} = 180^{\circ}\text{C}$, $\alpha_{нар} = 19 \text{ Вт/м}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C}$.

Площади внутренних и внешних поверхностей корпуса, воздушной прослойки и теплового экрана фена и их средние толщины выбраны исходя из конструкции фена: $F_{вн} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$; $F_{нк} = 5,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$; $F_{вн.э} = 11,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$; $F_{н.э} = 14 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$, $F_{нар} = 2,1 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$, $\delta_k = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $\delta_в = 10^{-2} \text{ м}$, $\delta_э = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Расчетные значения площадей корпуса НЭ $F_{рк} = 5,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$, воздушной прослойки $F_{рв} = 8,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ и теплового экрана $F_{рэ} = 12,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$, средние значения коэффициентов теплопроводности для материалов элементов конструкции фена приняты: для корпуса НЭ $\lambda_k = 18 \text{ Вт/м } ^{\circ}\text{C}$ (керамика УФ-61 $t_{p\text{ max}} = 1600^{\circ}\text{C}$), для воздушной прослойки $\lambda_{в.ср} = 7,15 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/м } ^{\circ}\text{C}$ и для теплового экрана $\lambda_{э.ср} = 0,092 \text{ Вт/м } ^{\circ}\text{C}$ (перлит на фосфатной связке ПФ-350, $t_{p\text{ max}} = 1150^{\circ}\text{C}$). Для бо-

лее высоких температур можно использовать диалект легковес, максимальная рабочая температура для которого $t_{p \max} = 1550^\circ\text{C}$, коэффициент теплопроводности $\lambda_d = 0,547 + 0,3 \cdot 10^{-3} t_{\text{cp}}$.

Подставляя значения параметров в формулу (40), найдем величину потерь теплоты через двухслойную стенку фена с воздушной прослойкой $Q = 50,8$ Вт.

Расчет по формуле (40) ведется методом последовательных приближений:

1. Задаем температурой наружной поверхности теплового экрана фена $t_{\text{нар}} = 180^\circ\text{C}$; принимаем ориентировочные значения температурных перепадов и соответствующие им средние температуры всех слоев, средняя температура воздушной прослойки $t_{\text{в.ср}} = 780^\circ\text{C}$, средняя температура теплового экрана $t_{\text{э.ср}} = 260^\circ\text{C}$.

2. Определяем тепловые потери $Q = 50,8$ Вт.

Проверяем значения температур на границе слоев по выражениям:

$$t_{\text{вн.к}} = t_{\text{вн}} - \frac{Q}{\alpha_{\text{вн}} F_{\text{вн}}} = 1182^\circ\text{C}; \quad (42)$$

$$t_{\text{н.к}} = t_{\text{вн.к}} - \frac{Q \cdot \delta_{\text{к}}}{\lambda_{\text{к.ср}} \cdot F_{\text{рк}}} = 1181,5^\circ\text{C}; \quad (43)$$

$$t_{\text{в}} = t_{\text{н.к}} - \frac{Q \cdot \delta_{\text{в}}}{\lambda_{\text{в.ср}} \cdot F_{\text{рв}}} = 367^\circ\text{C}; \quad (44)$$

$$t_{\text{э}} = t_{\text{в}} - \frac{Q \cdot \delta_{\text{э}}}{\lambda_{\text{э.ср}} \cdot F_{\text{рэ}}} = 149^\circ\text{C}; \quad (45)$$

$$t_{\text{нар}} = t_{\text{э}} - \frac{1}{\alpha_{\text{нар}} \cdot F_{\text{нар}}} = 23^\circ\text{C}. \quad (46)$$

Принятое значение температуры наружного воздуха $t_{\text{нар}} = 20^\circ\text{C}$.

Погрешность расчета температур различных слоев фена составляет 3°C , что вполне допустимо для температур отдельных слоев конструкции фена, достигающих 1180°C .

Для повышения надежности и срока службы штампа для горячей штамповки ленточного гофрированного карданного подвеса в качестве газообразного теплоносителя необходимо использовать инертный газ – например, азот с избыточным давлением в ресивере порядка 100 Па.

Конструкторская документация на фен ФП1-1СБ для горячей штамповки ленточного карданного подвеса акселерометра с максимальной температурой газа 1200°C приведена в приложении 4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Разработка кремниевых датчиков первичной информации для систем навигации и управления /Будкин В.Л., Паршин В.А. и др.// V Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам, май 1998. - 284 с. Государственный научный центр РФ – ЦНИИ “Электроприбор”, 1998.
2. Справочник по электротехническим материалам. Т.2 /Под ред. Ю.В.Корицкого и др. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - С.203.
3. Увакин В.Ф. Акселерометр. Патент РФ на изобретение № 2191390, 2002, Бюл. № 29.
4. Андреева Л.Е. Упругие элементы приборов. – Машгиз, 1962. - 456с.
5. Федин Э. Самое надежное соединение стеклянных деталей. //Изобретатель и рационализатор. - 1984. - №10, С.18.
6. Аш Ж.Андре Р., Бьюфронт и др. Датчики измерительных систем. В 2-х книгах. Кн.1. - М.: Мир, 1992. С. 388-389.
7. Пономарев С.Д., Андреева Л.Е. Расчет упругих элементов машин и приборов. - М.: Машиностроение, 1980. - 326 с.
8. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. – М.: Наука, 1974. – С. 93-95.
9. Увакин В.Ф. Олькова В.Б. Об одной конструкции гофрированной мембраны // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2003. № 4, С. 45-49.
10. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров), М.: Наука, 1974. – С.757.
11. Электрические измерения неэлектрических величин. /Под ред. П.В. Новицкого. – Л.: Энергия, 1975. – С.195-196.
12. Увакин В.Ф. Гофрированная оболочка. Патент РФ №2200807, Бюл. №8, 2003.
- 13.Шумилин Б. Алмазная гальваника. Журнал “Изобретатель и рационализатор” №11, 1989, -С.14...16.
14. Соколов П. От космических кораблей до водопроводных труб. Журнал “Изобретатель и рационализатор” №9, 1996. –С.8...9.
15. Конструкционные материалы: Справочник /Под общей ред. Б.Н. Арзамасова. –М.: Машиностроение, 1990. –688с.
16. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1973, - 320с.
17. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент. Справочник /Под общей ред. В.А. Григорьева и Б.М. Зорина. – М.: Энергоиздат, 1982, -512с.