

А. П. Адамов, А. А. Адамова, С. Г. Семенцов

СОВРЕМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ В КОНСТРУКЦИИ ДАТЧИКОВ ДЛЯ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

A. P. Adamov, A. A. Adamova, S. G. Sementsov

MODERN MATERIALS IN THE CONSTRUCTION OF SENSORS FOR AEROSPACE VEHICLES

Аннотация. В области авиастроения и разработках космических аппаратов наступил предел, когда исчерпаны все ресурсы, заложенные в конструкции летательных аппаратов. А развитие технического прогресса требует повышения скоростей, расширения потолка полетов, увеличения грузоподъемности и при этом сокращения себестоимости при изготовлении и расходов при эксплуатации. Частичная модернизация конструкции старых моделей с внедрением новых материалов способна внести дисбаланс в стройную структуру конструкции, а частичная замена приборов в системах управления и контроля снижает скорость срабатывания систем из-за различия точностных характеристик приборов. Конфликт между старым и новым проявляется в участившихся в последнее время авариях. В статье проведен анализ разработок в области технологий получения перспективных материалов, используемых в конструировании нового поколения контрольно-измерительных сенсоров, и показано, как появление новых датчиков может повлиять на безопасность полетов.

Ключевые слова: автоматизированные системы контроля, углепластики, композитные материалы, интерметаллиды, гибкие платы, пьезорезистивные сенсоры.

Abstract. In the field of aircraft construction and spacecraft development, the limit has come when all the resources inherent in the design of aircraft have been exhausted. And the development of technological progress requires increasing speeds, expanding the ceiling of flights, increasing carrying capacity and at the same time reducing production costs and operating costs. Partial modernization of the design of old models with the introduction of new materials can imbalance the slender structure of the structure, and partial replacement of devices in control and monitoring systems reduces the response speed of systems due to differences in the accuracy characteristics of devices. The conflict between the old and the new is manifested in the increasingly frequent accidents. The article analyzes the developments in the field of technologies for producing promising materials used in the design of a new generation of control and measuring sensors and shows how the appearance of new sensors can affect flight safety.

Keywords: automated control systems, carbon plastics, composite materials, intermetallic compounds, flexible boards, piezoresistive sensors.

Введение

Разработка нового поколения летательных аппаратов обходится во много раз дороже налаженного производства по его выпуску. Поэтому подчиняясь требованиям времени, с целью улучшения технических характеристик проводятся модернизации модели. Процесс модернизации столь сложного объекта прямолинейно зависит от процесса изменения надежности конструкции. Зависимость показана на рис. 1.

По оси X можно наблюдать степень изменения надежности, а по оси Y – нарастание процесса модернизации. С началом эксплуатации начинается и процесс модернизации, связанный с устранением дефектов, отмеченных при полетах в условиях эксплуатации, и которые невозможно смоделировать при контрольных испытаниях. Отрезок AB отмечает возрастание надежности в результате устранения отмеченных дефектов. Отрезок BC характеризует процесс модернизации с целью улучшения технических характеристик улучшением эргономики, усовершенствования отдельных узлов. На данном этапе результаты доработок контролируются расчетами, программами моделирования, стендовыми и натурными испытаниями и поэтому на фактор надежности не влияют. Но наступает момент, когда ресурсы данной конструкции исчерпаны полностью. В современном мире на фоне

технической революции изделия устаревают морально быстрее, чем наступает износ физический. Тогда наступает этап модификации, который характеризуется отрезком CD : идет частичная замена агрегатов, узлов и приборов на изделия, изготовленные с использованием новых технологий. Доработка позволяет решить задачи по доводке технических характеристик до уровня современных требований, но соединение в одной конструкции элементов, изготовленных по разным технологиям, приводит к возникновению в материалах конструкции очагов механических напряжений и резкому снижению надежности летательного аппарата. На отрезке DE надежность резко снижается и стремится к нулевой отметке. Здесь особо актуальна проблема обеспечения контроля за техническим состоянием летательного аппарата.

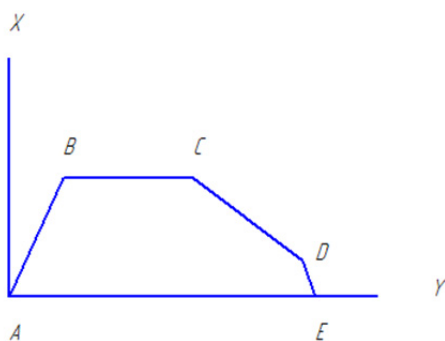


Рис. 1. График зависимости надежности конструкции от степени модернизации

Для обеспечения безопасности полета необходимо обеспечить контроль в режиме реального времени за состоянием конструкции, конструкционных материалов и рабочими параметрами оборудования. Кроме того, сделать качественный рывок в оптимизации технических характеристик отдельных систем и агрегатов, например двигателей (удельный расход топлива, полнота сгорания топлива, изменение габаритных размеров, применение новых конструкционных материалов, присадок к топливу повышающих КПД и т.п.), можно только при разностороннем и углубленном изучении процессов, происходящих во время работы двигателя в установившемся, форсированном и аэродинамическом режимах. Анализ собранных данных позволит повысить надежность конструкции, сократить расход топлива, повысить грузоподъемность, увеличить сроки эксплуатации и в результате уменьшить себестоимость обслуживания самолета. Но чтобы отследить и зафиксировать скоротечно протекающие процессы, необходимо оснастить летательный аппарат высокочувствительными датчиками давления, измерений напряжений, температуры, состава жидкостей, газоанализаторов, вибрации и т.д. В настоящее время данным требованиям отвечают контрольно-измерительные датчики на основе кристаллов из монокристаллического кремния.

Технологии МЭМС в развитии высокочувствительных сенсоров

Высокий темп развития технологий МЭМС позволяет при уменьшении габаритных размеров кристаллов увеличить чувствительность измерительных элементов к измеряемому параметру. Активно ведутся разработки многослойных кристаллов, объединяющих на своей поверхности функции измерения, обработки и передачи сигнала в цифровом формате. Ведутся интенсивные работы по усовершенствованию многослойных и гибких печатных плат с внедрением технологий получения новых видов полимерных и композитных материалов. В результате данных поисков уменьшаются габариты, повышается надежность печатных плат и в конечном итоге создаются предпосылки разработок малогабаритных изделий точного приборостроения. Это становится особенно актуально в настоящее время, когда постоянно совершенствуются и активно внедряются технологии БСС (беспроводной сенсорная сеть). Все вместе наработки позволяют разработать линейку датчиков для контроля различных параметров, обеспечивающих автоматизированный контроль за состоянием летательного аппарата, и разработать схему расположения датчиков с охватом даже самых труднодоступных мест. Причем датчики должны иметь высокую чувствительность к измеряемому параметру, малые габариты, возможность надежного крепления на поверхности без нарушения целостности материала объекта и возможность передавать информацию, используя протоколы радиочастотной связи, без укладки проводов. Учитывая сложные условия эксплуатации летательных ап-

паратов: резкие перепады температур, высокие механические нагрузки, радиационные излучения и т.п., увеличивается количество параметров, необходимых для разработки системы автоматизированного контроля, отображающей объемную картину технического состояния систем, отдельных агрегатов и корпуса аппарата в режиме реального времени. В ходе решения данной задачи возрастают требования к точности измерения параметров, скорости обработки и передачи информации на главный компьютер. Выполнение данных требований возлагается на высокоточные датчики. Малая погрешность измерения и высокая надежность датчика определяются качеством чувствительного элемента и печатной платы схемы обработки сигнала. Существует определенная закономерность в конструировании высокоточных датчиков: чем выше чувствительность измерительного элемента, тем выше точность измерения датчика. Пьезорезистивные чувствительные элементы обладают настолько высокой чувствительностью к механическим внутренним напряжениям контактирующих материалов, что разработчики датчиков сталкиваются с проблемой стабильности замеров. Для обеспечения высокой точности замеров и долгосрочной стабильности показаний датчика необходимо конструктивно защитить чувствительный элемент от влияния физико-механических изменений в окружающих материалах. Разработки новых классов конструкционных материалов позволяют эффективно решать возникающие проблемы. Современный уровень разработки новых поколений материалов на базе наноконструкций, технологии тонкопленочного напыления и высокоэффективного вакуумного оборудования расширяют возможности применения в приборостроении комбинации различных материалов, которые в конструкции будут взаимно улучшать свойства.

Сенсоры для автоматизированной системы контроля

Для разработки автоматизированной системы контроля за работой систем и состоянием конструкционных материалов летательного аппарата во время полета необходимо создать сеть объемного отображения характеристик отдельных блоков, узлов, трубопроводов и т.д. в режиме реального времени. Выполнить данное условие можно, поместив одновременно в определенных точках измерительные сенсоры замера группы параметров, например, давления, температуры, вибрации, перепад давлений, величину внутреннего напряжения материала или газоанализатор. Особую сложность представляет организация контроля за работой двигателей. Машинная обработка нескольких параметров одновременно даст возможность определить слабое звено на начальной стадии и своевременно принять меры. Таких сенсоров понадобится большое количество. Отсюда вытекают основные требования: малые габариты, минимальный вес, адаптация к использованию в составе беспроводной сенсорной сети и высокая чувствительность к измеряемому параметру. Высокая чувствительность позволяет проводить замеры давления, перепада давлений, скорости движения жидкости или газа в трубопроводе по давлению звука, а также определять координаты локальной разгерметизации корпуса по изменению внутренних напряжений в материале. Главное условие, чтобы для их установки не требовалось повреждать поверхность обшивки, трубопровода или корпусов блоков. Помочь могут пьезорезистивные сенсоры. Они обладают высокой чувствительностью за счет тензорезистивных свойств монокристаллического кремния и у них отсутствует зона нечувствительности измерения в начале шкалы измерения. Указанные свойства позволяют разработать конструкцию датчиков давления, деформации монтируемых методов наложения на поверхность трубы, емкости или конструкции корпуса. Технологии изготовления кристаллов пьезорезистивных чувствительных элементов отработаны и при серийном производстве обеспечивается низкая себестоимость. К недостаткам кремниевых структур можно отнести диапазон рабочих температур от -60 до $+125$ °С, что недостаточно для их установки на авиационных и ракетно-космических двигателях, где температуры достигают 900 °С. Повысить теплостойкость чувствительных элементов позволяют разработки функционального материала для высокотемпературных и радиационно-устойчивых структур: монокристаллический карбид кремния. Величина энергии связи между Si и C обеспечивает высокую термическую, радиационную и химическую стойкость как самому материалу, так и приборам на его основе [1]. Использование карбида кремния в изготовлении чувствительных элементов для контрольно-измерительных датчиков позволит уменьшить размеры кристалла и повысить механическую прочность.

Перспективные материалы для разработки перспективных сенсоров

Чувствительный элемент нуждается в защите от механических повреждений и воздействия окружающей среды. Эту функцию выполняют элементы конструкции датчика, которые как бы об-

волакивают чувствительный элемент слой за слоем. Причем материалы этих слоев подбираются с максимально близкими механическими характеристиками с целью минимизировать влияние локальных механических напряжений, возникающих в зонах соединений материалов, на погрешность измерения чувствительного элемента. В настоящее время конструкционными материалами являются нержавеющая сталь 12Х18Н10Т, алюминиевые сплавы или конструкционные пластмассы. Они способны обеспечить работоспособность датчика, но не соответствуют современным требованиям по габаритным размерам, массе, способам крепления в точках измерения, долговременной стабильности сигнала, технологиям передачи информации. Наступает время пересмотреть концепцию проектирования контрольно-измерительных датчиков. Ввиду широкого внедрения технологий получения композитных материалов, обладающих прочностными характеристиками, не уступающими металлам, но имеющим преимущества в удельном весе, простоте получения сложных конструкций малых форм и более низкой стоимости. Кроме того, стало возможным получать материалы с заданными свойствами: прозрачными для радиоволн, защитными от радиационного излучения, от теплового излучения и т.д. Преимущество композитных материалов заключается в объединении нескольких различных по своей структуре материалов в одну структуру со строго индивидуальными свойствами. А это меняет отношение разработчика к разработкам новых моделей контрольно-измерительных датчиков: позволяет изначально строить конструкцию, адаптированную на установку в конкретной точке конструкции летательного аппарата, т.е. не подбирать материалы, которые одновременно обеспечат заданные техническим заданием характеристики датчика и органически впишутся в конструкцию аппарата, а в ходе конструирования создавать материалы деталей, узлов датчика, которые не только позволят создать конструкцию, соответствующую требованиям внешнего вида, крепления на объекте, электросоединений, обмена информацией, но и повысят надежность датчика, долговременную стабильность выходного сигнала и точность измерения за счет подбора свойств материалов, соединяющихся между собой единицы сборки с близкими физико-механическими свойствами и позволяющими подобрать технологии соединений с минимальным уровнем образования внутренних механических напряжений. Эта особенность композитов играет ключевую роль в проектировании автоматизированных систем контроля и управления системами летательных аппаратов, где требуются тысячи датчиков, работающих в различных условиях и потому имеющих различные конструкции корпусов: с резьбовыми штуцерами на большие давления и механические нагрузки в гидро- и пневмосистемах, малогабаритные корпуса без штуцеров с креплением с помощью клеевого соединения на поверхности внутри летательного аппарата и тонкопленочные на базе гибких плат для установки на внешней поверхности летательного аппарата. В настоящее время имеются серьезные наработки композитных материалов, пригодных для использования в проектировании датчиков. На замену нержавеющей стали приходят интерметаллиды (химические соединения металлов), которые по своей структуре занимают промежуточное положение между металлом и керамикой, и углепластики. Интерметаллиды системы титан-алюминий интересны в узлах, где требуется герметичность и стабильность структуры при большом температурном диапазоне от -253 до $+850$ °С, резкие перепады давлений, глубокий вакуум, вибрационные нагрузки, радиационное воздействие. Подобная структура материала, кроме защиты от внешних воздействий, играет роль демпфера, нивелируя в своем объеме механические напряжения, возникающие в материалах, контактирующих со штуцером датчика. А вот для изготовления корпусов, которые выполняют роль защиты электронных компонентов схем обработки и передачи сигнала от чувствительного элемента, по своим свойствам наиболее подходят – углепластики, материалы, состоящие из полимерной матрицы и углеродных волокон, полученных из синтетических и природных волокон на основе целлюлозы, сополимеров акрилонитрила, нефтяных и каменноугольных пеков и т.д. В этой композиции прочностные характеристики на растяжение обеспечиваются в основном за счет углеродных волокон, а за прочность на сжатие и сдвиг и физико-химические свойства – связующее. Один из лучших на сегодняшний день вариантов связующего для композитных материалов – цианат-эфирные связующие. В ООО «Научно-исследовательский институт космических и авиационных материалов» разработали связующее НИИКАМ-РС и экспериментальные образцы нового адамантан-олигоциануратного типа. Испытания экспериментальных образцов показали, что коэффициент линейного температурного расширения (КЛТР) на 25 % ниже, чем эпоксидного связующего и на 12 % ниже, чем у НИИКАМ-РС. По показателям влагопоглощения, которые характеризуют размеростабильность образцов, эпоксидные связующие на порядок проигрывают цианат-эфирным. Отличительная особенность адамантан-

олигоциануратного связующего обоснована наличием в его мономерных звеньях фрагмента адмантана, повторяющего структурную решетку алмаза, что придает особую жесткость полимерным молекулам, температурную стойкость, также гидрофобность вследствие малой полярности [2]. Подобная комбинация материалов гарантирует стабильность геометрических размеров корпуса и защиту чувствительного элемента от воздействия радиационного излучения, химически агрессивной среды, механических повреждений и важная деталь, материал корпуса пропускает радиоволны и, следовательно, датчик может передавать и получать информацию по протоколам беспроводной связи. Данный материал также допустимо использовать для разработки малогабаритных корпусов, где не требуется герметичность. Для герметичных корпусов лучшим вариантом является керамика 22ХС и при необходимости отвода большого количества тепла бериллиевая керамика. Из керамики легко получают конструкции различной конфигурации. Спаи керамики и металла образуют герметичные выводы для передачи электрических сигналов. Датчики в данном исполнении удобно использовать в различных труднодоступных местах внутри летательного аппарата при минимальной доработке поверхности места установки, но для установки на наружной поверхности аппарата они имеют недопустимые размеры по толщине. Приповерхностные датчики должны размещаться в приповерхностном слое обтекаемого объекта на строго определенную высоту. Выступление датчика выше норматива даже на доли миллиметра может исказить величину измерения, а также попасть в зону тепловых или механических нагрузок, превышающих верхний предел допустимых нагрузок на датчик. В экспериментальных исследованиях хорошо зарекомендовали себя емкостные пленочные датчики. Но из всех физических параметров, контролируемых такими датчиками, наименее эффективно решается задача об измерении полей давления вблизи поверхности объекта [3]. Повысить эффективность измерений давления способны высокочувствительные пьезорезистивные чувствительные элементы. За последние десять лет технологии по выпуску кристаллов для измерения давления позволили уменьшить габаритные размеры до 2×2 мм и толщины до 200 мкм, а на кристаллах 4×4 мм формируются схемы обработки сигнала и передачи в цифровом виде [4]. Победить хрупкость кристаллов помогли технологии соединения отдельных кристаллов со стеклянной подложкой и напыления на кремний методом магнетронного напыления стекла толщиной до 50 мкм. Стеклянная подложка благодаря структуре стекла нивелирует внутренние напряжения в системе кремний-стекло и тем самым увеличивает прочность конструкции и уменьшает погрешность измерения [5]. Описанная конструкция чувствительного элемента обеспечивает адаптацию тщательно отработанной сотрудниками ЦАГИ технологии сборки и крепления пленочных датчиков на объекте [3] к технологии сборки пленочных датчиков на базе пьезорезистивных чувствительных элементов и микроэлектроники нового поколения: органической и печатной электроники [6].

Заключение

В статье проанализированы новые направления в разработках конструкционных материалов, позволяющие сблизить технологии МЭМС и точного приборостроения. Слияние данных технологий открывает путь к созданию новой отрасли в приборостроении: разработка и производство линейки высокоточных микродатчиков для авиационных и космических аппаратов. Набор подобных микродатчиков станет базой для отработки автоматизированных систем мониторинга рабочих параметров оборудования и обратной связи управления. Для обеспечения безопасности полета самостоятельная система мониторинга с контролем деформации материала корпуса, давления, состава воздуха, температуры и т.д. датчики можно частично объединить в беспроводную сенсорную сеть. Малые габариты и вес датчиков, а также частичный отказ от проводов позволят повысить грузоподъемность летательного аппарата.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке по гранту РФФИ №17-07-00689.

Библиографический список

1. Лучинин, В. В. Отечественный полупроводниковый карбид кремния: шаг к паритету / В. В. Лучинин, Ю. М. Таиров // Современная электроника. – 2009. – № 7. – С. 12–15.
2. Вихров, И. А. Адамтан-олигоциануратные связующие для размеростабильных углепластиковых конструкций космических аппаратов / И. А. Вихров, В. Ф. Аристов, Д. А. Гуров // Решетневские чтения. – Красноярск : Изд-во Сиб. гос. ун-та науки и технологий им. акад. М. Ф. Решетнева, 2015. – С. 91–93.

3. Исследование методов синтеза распределенных сенсорных систем по критерию минимизации сетевой нагрузки / А. А. Адамова, А. Н. Алфимцев, А. И. Власов, С. Г. Семенцов, Т. А. Цивинская, М. Н. Юлдашев. – Москва : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017. – 75 с.
4. Адамов, А. П. Методологические основы обеспечения технологичности электронных средств / А. П. Адамов, Г. Х. Ирзаев, А. А. Адамова. – Санкт-Петербург : Политехника, 2008. – 312 с.
5. Сергеева, С. Н. Контрольно-измерительные МЭМС с использованием малогабаритных чувствительных элементов из монокристаллического кремния для аэрокосмической отрасли / С. Н. Сергеева, В. А. Шахнов, Т. А. Цивинская // Датчики и системы. – 2016. – № 2. – С. 32–39.
6. Адамов, А. П. Методы обеспечения надежности в беспроводных сенсорных сетях по критерию сетевой нагрузки / А. П. Адамов, А. А. Адамова, М. Н. Юлдашев // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2016. – Т. 1. – С. 197–199.

References

1. Luchinin V. V., Tairov Yu. M. *Sovremennaya elektronika* [Modern electronics]. 2009, no. 7, pp. 12–15. [In Russian]
2. Vikhrov I. A., Aristov V. F., Gurov D. A. *Reshetnevskie chteniya* [Reshetnev readings]. Krasnoyarsk: Izd-vo Sib. gos. un-ta nauki i tekhnologii im. akad. M. F. Reshetneva, 2015, pp. 91–93. [In Russian]
3. Adamova A. A., Alfimtsev A. N., Vlasov A. I., Sementsov S. G., Tsivinskaya T. A., Yuldashev M. N. *Issledovanie metodov sinteza raspredelennykh sensorykh sistem po kriteriyu minimizatsii setevoy nagruzki* [Research of methods of synthesis of distributed sensor systems by the criterion of network load minimization]. Moscow: MGТУ im. N. E. Bauman, 2017, 75 p. [In Russian]
4. Adamov A. P., Irzaev G. Kh., Adamova A. A. *Metodologicheskie osnovy obespecheniya tekhnologichnosti elektronnykh sredstv* [Methodological bases for ensuring the technological effectiveness of electronic means]. Saint-Petersburg: Politekhnik, 2008, 312 p. [In Russian]
5. Sergeeva S. N., Shakhnov V. A., Tsivinskaya T. A. *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems]. 2016, no. 2, pp. 32–39. [In Russian]
6. Adamov A. P., Adamova A. A., Yuldashev M. N. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2016, vol. 1, pp. 197–199. [In Russian]

Адамов Александр Петрович

доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки Республики Дагестан,
кафедра микроэлектроники,
Дагестанский государственный
технический университет
(Россия, Республика Дагестан,
г. Махачкала, ул. Шамиля, д. 70)
E-mail: arinaadamova75@gmail.com

Адамова Арина Александровна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра проектирования и технологии
производства электронной аппаратуры,
Московский государственный технический
университет им. Н. Э. Баумана
(Россия, г. Москва, 2-ая Бауманская, 5)
E-mail: arina.adamova@rambler.ru

Семенцов Станислав Григорьевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра проектирования и технологии
производства электронной аппаратуры,
Московский государственный технический
университет им. Н. Э. Баумана
(Россия, г. Москва, 2-ая Бауманская, 5)
E-mail: siemens_off@mail.ru

Adamov Alexander Petrovitch

doctor of technical sciences, professor,
honored scientist of the Republic of Dagestan,
sub-department of microelectronics,
Dagestan State Technical University
(70 Shamil street, Makhachkala, Dagestan, Russia)

Adamova Arina Aleksandrovna

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of design and production technology
of the electronic equipment,
Bauman Moscow State Technical University
(5 2-ya Baumanskaya street, Moscow, Russia)

Sementsov Stanislav Grigorievich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of design and production technology
of the electronic equipment,
Bauman Moscow State Technical University
(5 2-ya Baumanskaya street, Moscow, Russia)

Образец цитирования:

Адамов, А. П. Современные материалы в конструкции датчиков для аэрокосмических аппаратов / А. П. Адамов, А. А. Адамова, С. Г. Семенцов // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 1 (29). – С. 84–90. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-1-10.