

На правах рукописи

УДК 621.486

A handwritten signature in black ink, consisting of several fluid, connected strokes.

Козлов Дмитрий Владимирович

**ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИЕ АКТЮАТОРЫ
ДЛЯ СИСТЕМ МИКРОПЕРЕМЕЩЕНИЙ
В УСЛОВИЯХ ОТКРЫТОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА**

05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники
и систем управления

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2012

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана и ОАО «Российские космические системы»

Научный руководитель

чл.- корр. РАН, д-р техн. наук, профессор

Шахнов Вадим Анатольевич

Официальные оппоненты:

д-р техн. наук, профессор

(нач. отдела НТЦ НИЭМИ ОАО ГСКБ «Алмаз-Антей», г. Москва)

Костиков Владимир Григорьевич

канд. техн. наук

(главный технолог, начальник НИТК ОАО «НИИФИ», г. Пенза)

Волохов Игорь Валерианович

Ведущая организация

Московский институт электронной техники
(НИУ «МИЭТ», г. Москва, Зеленоград)

Защита диссертации состоится « 2 » октября 2012 г. в 14:30 часов на заседании диссертационного совета Д212.141.02 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, Госпитальный пер., д.10, ауд. 613м.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба выслать по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан « 13 » июля 2012 г.

Телефон для справок: 8(499) 267-89-63.

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



2000599

Козлов Д.В. Термомеханически

600

Ученый секретарь диссертационного совета
канд. техн. наук, доцент

Муратов И.В.

281

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В настоящее время растёт интерес к микроминиатюрным электромеханическим преобразователям – устройствам микросистемной техники, что обусловлено значительными возможностями, позволяющими резко расширить те сферы применения, где необходимы небольшие масса и габариты при значительных функциональных возможностях – научное приборостроение, микроробототехника, телекоммуникационные системы, биомедицинские технологии, изделия космического применения и пр. Методы производства микроэлектромеханических систем, основанные на технологии микрообработки кремния, предлагают возможность изготовления дешёвых и миниатюрных устройств, сравнимых по функциональности с более крупными аналогами. Однако данная технология имеет большой недостаток в виде непригодности к изготовлению трёхмерных структур. Это препятствие пытаются преодолеть самыми различными способами. Один из них – метод использования дополнительного полиимидного слоя. Данное решение содержится в конструкции разрабатываемого термомеханического актюатора.

Термомеханические актюаторы способны выдерживать миллионы циклов срабатывания, жёсткие условия открытого космического пространства, не содержат механических, склонных к быстрому износу деталей и обладают хорошим соотношением цена/качество благодаря возможности их группового изготовления. Разработка термомеханических актюаторов предложенного типа уникальна для РФ и требует подробного обзора существующих прототипов, моделирования и экспериментального исследования их выходных характеристик, в том числе при воздействии внешних дестабилизирующих факторов.

Диссертационная работа посвящена решению актуальной задачи – разработке конструкции и исследованию функциональных возможностей термомеханических актюаторов для систем микроперемещений в условиях открытого космического пространства с целью их применения в высокотехнологичных изделиях микророботехники и систем управления.

Состояние проблемы. Большой вклад в разработку и исследование термомеханических актюаторов внесли шведские учёные Э. Кальвестен (E. Kälvesten) и Т. Эбефорс (T. Ebefors) своей работой «Polyimide V-groove joints for three-dimensional silicon transducers» (Стокгольм, Швеция: Royal Institute of Technology, 2000). Кроме того, известны работы таких учёных, как М. Гад-Эль-Хака (M. Gad-el-Hak), В. Ритмюллера (W. Riethmüller), Н. Тиена (N. Tien), М. Атака (M. Ataka) и др.

Однако, материалы, представленные в данных работах, не обладают полной в части теоретического и экспериментального исследования характеристик актюаторов, а также не отражают поведение актюатора при воздействии дестабилизирующих факторов открытого космического пространства и при временном «старении».

Цель работы. Целью диссертационной работы является разработка принципа функционирования, математической модели, конструкции и проведение экспериментальных исследований, направленных на изучение влияния конструкционных параметров и внешних возмущающих воздействий на его работу.

Решаемые задачи:

1. Обзор имеющихся конструкций актюаторов и выбор наиболее эффективного принципа действия.
2. Моделирование поведения термомеханического актюатора при различных возмущающих воздействиях, а также влияния конструкционных факторов на его характеристики, оценка точности моделирования.
3. Определение основных параметров, влияющих на работу термомеханических актюаторов, степени их влияния и возможных методов их исследования.
4. Анализ и разработка методик, создание стендов по исследованию характеристик термомеханических актюаторов, в том числе в условиях, близких к условиям открытого космического пространства.
5. Разработка методики испытаний на циклическую нагрузку термомеханического актюатора в целях установления примерного времени до отказа изделия.
6. Проведение испытаний актюаторов по разработанным методикам, направленных на установление влияния конструкционных параметров, а также внешних возмущающих воздействий на эксплуатационные характеристики термомеханических актюаторов.

Методы исследования. Для анализа и исследования выходных характеристик термомеханических актюаторов применено моделирование с использованием САПР, основанной на методе конечно-элементного анализа. В ходе экспериментальных исследований применены оптический и гониометрический методы измерения деформации, пирометрический метод измерения температуры и акусто-резонансный метод измерения силовых характеристик.

Научная новизна работы:

1. Разработан оригинальный конструктивный вариант термомеханического актюатора с V-образными канавками, отличающийся высоким ресурсом работы при эксплуатации в условиях открытого космического пространства.
2. Разработана модель перемещения термомеханического актюатора с периодической структурой, подвергаемой активному или пассивному тепловому воздействию, отличающаяся широкими возможностями задания внешних влияющих факторов.
3. Разработана серия новых методов исследования выходных характеристик термомеханического актюатора, отличающихся высокой точностью, универсальностью и широким кругом измеряемых параметров, частично имитирующая ряд дестабилизирующих факторов открытого космического пространства.

4. Проведено комплексное исследование выходных характеристик термомеханических актюаторов, позволившее определить степени влияния конструктивных факторов, а также внешних возмущающих воздействий.

Достоверность полученных научных результатов, выводов и рекомендаций диссертационной работы подтверждена положительными результатами проведенных экспериментальных исследований, а также использованием разработанных моделей и методик в НИР и ОКР, позволивших успешно изготавливать работоспособные образцы термомеханических актюаторов и устройства на их основе.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Конструкция термомеханического актюатора, обеспечивающая управляемое перемещение подвижного элемента и усилия до 5 мН в условиях, близких к условиям открытого космического пространства на протяжении 32 и более миллионов циклов.

2. Методы исследования характеристик актюатора, обеспечивающие измерение величины деформации по углам отклонения до 180 градусов в диапазоне температур от 123 до 583 К с погрешностью 0,24 градуса; определение температурного коэффициента линейного расширения полиимидного слоя в структуре актюатора с погрешностью 4,2 %; измерение нагрузочной способности актюаторов с погрешностью 2,3% в диапазоне от 0,1 мН до 2,15 Н; оценку влияния конвективной составляющей на характеристики актюатора, а также возможность судить о жизнеспособности актюаторов и стабильности их характеристик в процессе эксплуатации.

3. Аналитическая тепловая и численная электро-термо-механическая модели термомеханического актюатора, позволяющие установить конструктивные параметры работоспособного актюатора с требуемыми выходными характеристиками.

4. Результаты исследования характеристик актюаторов, позволяющие подтвердить положения об их высокой надёжности, функциональности и возможности их применения в условиях открытого космического пространства.

5. Рекомендуемые режимы функционирования термомеханических актюаторов, обеспечивающие улучшение его термдеформационных характеристик и увеличение частоты срабатывания.

Практическая значимость и результаты внедрения. Разработанные термомеханические актюаторы, методы и результаты их исследований использованы в научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах и разработках ОАО «Российские космические системы»: «Разработка базовых технологий и конструкций, комплектов технологической и конструкторской документации на изготовление микроприводов с напряжением управления» (гос. контракт №754 – Б028/08 от 23.07.2008 г.); «Исследование путей создания малогабаритных антенн с управляемыми характеристиками на основе метаматериалов» (гос. контракт № 16.740.11.0080 от 01.09.2010 г.). На предприятии создана опытная партия образцов термомеханических актюаторов и разработаны КД, ТД и ТУ на них.

Разработанные методы, модели, а также режимы функционирования термомеханических актюаторов внедрены в производственные процессы ОАО «Российские космические системы» и позволили изготавливать актюаторы с заданными, необходимыми для конкретного применения характеристиками и подтверждать их достоверность проведёнными испытаниями.

Результаты работы использованы в учебный процесс на кафедре «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры» МГТУ имени Н.Э. Баумана.

Основной практической ценностью работы является возможность создания функционально законченных систем на основе термомеханических актюаторов, позволяющих при меньших размерах и большей надёжности решать аналогичные существующим системам задачи в условиях открытого космического пространства.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на VII и VIII всероссийских научно-практических конференциях «Микротехнологии в авиации и космонавтике» (г. Москва, 2009, 2010 гг.); II и IV всероссийских научно-технических конференциях «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий» (г. Москва, 2009, 2011 гг.); III международной конференции с элементами научной школы для молодёжи «Функциональные наноматериалы и высокочистые вещества» (г. Суздаль, 2010 г.); международном форуме «Дорога к звёздам» (г. Королёв, 2011 г.); XIV молодежной международной научно-технической конференции «Наукоёмкие технологии и интеллектуальные системы – 2012» (г. Москва, 2012 г.); XV Юбилейном международном Салоне изобретений и инновационных технологий «Архимед-2012».

Работа отмечена серебряной медалью XV Юбилейного международного Салона изобретений и инновационных технологий «Архимед-2012» и стипендией Президента РФ.

Публикации. По материалам и основному содержанию работы опубликованы 12 научных работ в научно-технических журналах и трудах конференций, из них 4 научные работы опубликованы в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК, оформлено 3 заявки на патент РФ на изобретение, получившие положительное решение о выдаче патента, получен 1 патент РФ на изобретение. Результаты работы отражены в 5 научных отчётах, выполненных в ОАО «Российские космические системы» при участии автора.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав с выводами, заключения и списка литературы. Материалы диссертации изложены на 198 страницах, включая 105 рисунков, 6 таблиц и список литературы из 60 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность решения поставленных в диссертации задач и научная новизна, показаны цели работы. Рассмотрены основные области применения объекта исследования. Кратко описаны основные трудности, возникающие при исследованиях термомеханических актюаторов и возможности по улучшению их характеристик.

В первой главе проведён сравнительный обзор известных конструктивных вариантов и принципов действия микросистемных актюаторов. Предложена классификация актюаторов и приведены наиболее значимые их характеристики.

Для электростатических актюаторов положительным является скорость их функционирования (до 5 кГц), но небольшие перемещения и усилия, а также высокое напряжение срабатывания и нелинейность рабочих характеристик относятся к их недостаткам. Магнитные актюаторы малочувствительны к влажности и пыли, хорошо подходят для устройств, в которых присутствуют большие токи и напряжения, дают большие перемещения подвижного элемента актюатора и обладает значительными усилиями, но при их изготовлении существуют ограничения по выбору магнитного материала, к тому же трёхмерные обмотки очень тяжело изготовить на микроуровне, актюаторы потребляют большое количество энергии и рассеивают много тепла. Пьезоприводы обладают высоким коэффициентом полезного действия и быстродействием, но очень малыми величинами перемещения и большим значением управляющего напряжения.

Основным недостатком термомеханических актюаторов является их низкое быстродействие и коэффициент полезного действия. При этом во многих задачах это компенсируется одними из самых высоких усилий и величин деформаций (порядка 50%). Микроробототехнические устройства для использования в условиях открытого космического пространства, на которых планируется применение разработанных актюаторов, требуют, прежде всего, стабильных характеристик исполнительного элемента, высоких усилий, широкого диапазона деформаций, необходимых для перемещений объектов, а также простой групповой технологии их изготовления. Всем этим параметрам наиболее полно удовлетворяет термомеханический тип актюатора с V-образными полиимидными канавками, который и был выбран в качестве предмета исследования и разработки.

Во второй главе проведено моделирование работы термомеханического актюатора. Результатом построения аналитической тепловой модели стала система из двух дифференциальных уравнений, описывающая процессы теплообмена внутри структуры актюатора. Решением системы является следующее выражение:

$$\theta_{os}(\tau) = \frac{(N-1) \cdot U^2 \cdot h \cdot \left(a_{xpi} + \frac{h}{ig54,74} \right) \cdot (1 + \sigma_{\gamma, cp} / \sigma_{\partial z, \gamma})}{\rho_{Si} \cdot b \cdot [\sigma_{\partial z, cp} + \sigma_{\gamma, cp} \cdot (1 + \sigma_{\gamma, cp} / \sigma_{\partial z, \gamma})]} \cdot [1 - \exp(-0,175 \cdot \tau)] \quad (1)$$

где U – напряжение питания актюатора,
 N – количество полиимидных вставок,
 h – толщина актюатора,
 $a_{\text{кр1}}$ – ширина верхней грани кремниевого резистора,
 b – ширина актюатора,
 σ – тепловые проводимости между элементами актюатора и окружающей средой.

Определив температурное распределение возможно найти и отклонение хвостовика актюатора от первоначального положения:

$$\Delta y(\tau) = 2 \cdot N \cdot \left[\operatorname{atg} \left(\alpha \cdot \vartheta_{\text{ср}}(\tau) + 1 \right) \cdot \left(2 \cdot \operatorname{tg} \left(35,26 - \frac{\gamma_0}{2 \cdot N} \right) \right) - \operatorname{atg} \left(2 \cdot \operatorname{tg} \left(35,26 - \frac{\gamma_0}{2 \cdot N} \right) \right) \right] \quad (2)$$

где α – температурный коэффициент линейного расширения полиимида, входящего в состав актюатора.

Таким образом, показано, что деформационные характеристики термомеханического актюатора зависят от значения температуры нагретой зоны, количества канавок и от характеристик деформируемого материала в канавках. В свою очередь, температуру нагретой зоны определяют временные составляющие, характеристики подаваемого электрического сигнала, геометрические параметры актюатора и параметры теплообмена с окружающей средой. В то же время такой параметр, как глубина залегания полиимида в канавке при прочих равных условиях оказывает не существенное влияние на его деформационные характеристики. Ширина актюатора влияет в большей степени на электрические характеристики кремниевых резисторов и при сопоставимых значениях мощности тоже не оказывает существенного влияния на деформацию актюатора, сказываясь лишь на его силовых характеристиках.

Численная модель электро-термо-деформационных процессов при работе актюатора составлена в программном комплексе конечно-элементного анализа ANSYS. Определено распределение температуры при работе актюатора от электрического напряжения. Установлены значения перемещений и нагрузок актюатора заданного типоразмера при напряжении в 10 В и при различных внешних температурных воздействиях. Установлены значения возникающих в структуре актюатора механических напряжений, показано, что максимальные напряжения локализованы в месте закрепления актюатора. Результаты проведенных расчётов модели подтвердили работоспособность термомеханического актюатора в условиях жёсткого температурного воздействия, в том числе и соответствующим условиям открытого космического пространства. Определено значение нагрузки в 1,3 мН, соответствующее массе, которую способен выдержать актюатор при работе от напряжения 10 В.

Результатом параметрических расчётов стало определение влияний электрического напряжения, температурного и силового воздействия на выходные характеристики актюатора. С помощью полученной параметрической модели проанализировано влияние размеров актюатора,

глубины залегания полиимида, количества канавок, содержащих полиимид, а также используемых материалов и других факторов на исследуемые характеристики (перемещение, нагрузки, температурное взаимодействие, внутренние напряжения в структуре) как в статике, так и в динамике. Установлена зависимость, определяющая степень влияния температурного коэффициента линейного расширения полиимидного слоя на работу термомеханического актюатора.

В третьей главе подробно рассмотрена конструкция термомеханического актюатора и принцип его работы. Определены наиболее подходящие материалы, используемые при изготовлении термомеханических актюаторов. Приведены основные технологические операции, применяемые на этапе изготовления актюаторов.

На рисунке 1 представлена конструкция предложенного актюатора. Отличительными признаками конструкции является применение V-образных канавок, выполненных в кремнии, заполненных термостойким полимером - полиимидом, и предназначенных для обеспечения многократной деформации конструкции под действием температур. Деформация происходит за счёт разницы в значениях температурных коэффициентов линейного расширения полиимида и кремния, входящих в структуру. При нагреве каждая из трапецевидных полиимидных вставок испытывает деформацию, причём верхняя грань в абсолютном значении расширяется больше, чем нижняя, а граница кремний-полиимид остаётся неподвижной, благодаря чему и происходит изгиб балки актюатора. Нагрев происходит за счёт сформированных на нижней поверхности резисторов, либо за счёт резисторов, сформированных из кремниевых вставок. Во втором варианте значительно упрощается технология и увеличивается надёжность системы в целом.



Рисунок 1. Термомеханический актюатор (а) и его фотографии (б)

Таким образом, в качестве материалов для изготовления термомеханических актюаторов выбраны следующие: кремний как основной структурный слой и как резистивный слой, полиимид как слой, обеспечивающий деформацию

актюатора, и алюминий, образующий слой проводников, обеспечивающих подачу питания на резисторы.

Проанализированы применяемые методики по исследованию термомеханических актюаторов, составлены сравнительные таблицы различных методов изучения деформационных и силовых характеристик. Выбраны наиболее предпочтительные варианты, позволяющие с большой точностью, достоверностью и стабильностью проводить измерения и максимально продуктивно использовать эти результаты в научно-исследовательской деятельности. Результатом выбора стали следующие методы:

- метод измерения деформаций термомеханических актюаторов длиной (2-50) мм с частотой (0 – 30) Гц при воздействии температур от 123 до 583 К, основанный на применении гониометрического метода, обеспечивающего измерение величины деформации по углам отклонения до $180 \pm 0,05$ градусов относительно базовой линии с погрешностью 0,24 градуса. Методика также позволяет рассчитывать температурный коэффициент линейного расширения применённого полиимида с погрешностью 4,2 % и коэффициент деформации, характеризующий конструкцию термомеханического актюатора. Формула для определения температурного коэффициента полиимида представлена ниже:

$$\alpha = \frac{1}{\Delta T} \cdot \left(\frac{\cos\left(35,26 - \frac{\gamma}{2n}\right) \cdot \cos\left(35,26 - \frac{\gamma_0}{2n}\right) \pm \sqrt{\cos^2\left(35,26 - \frac{\gamma}{2n}\right) \cdot \cos^2\left(35,26 - \frac{\gamma_0}{2n}\right) - \cos\left(70,52 - \frac{\gamma_0}{n}\right)}}{\cos\left(70,52 - \frac{\gamma_0}{n}\right)} - 1 \right) \quad (3),$$

где γ_0 – угол отклонения актюатора при начальной температуре, град.,

γ – угол отклонения актюатора при заданной температуре, град.,

n – количество канавок в конструкции актюатора, шт.,

ΔT – диапазон изменения температуры, К;

- метод измерения силовых характеристик балок термомеханических актюаторов, подвергнутых воздействию контролируемой нагрузки в диапазоне от 0,1 мН до 2,15 Н, позволяющий оценивать нагрузочную способность актюаторов с погрешностью 2,3%;

- метод многоцикловых усталостных испытаний балок термомеханических актюаторов при заданной температуре и частоте, позволяющий судить о жизнеспособности актюаторов и стабильности их характеристик в процессе эксплуатации и оценивать влияние «старения» материалов балок на эти характеристики;

- метод исследования тепловых и электрических характеристик термомеханических актюаторов, в том числе в условиях пониженного

атмосферного давления в диапазоне от 1 атм. до 10^{-4} Па, основанный на бесконтактном и/или термопарном методе измерения температуры и использовании вакуумной камеры установки магнетронного напыления, позволяющий определять влияние конвективной составляющей на теплообменные процессы и электрические характеристики в ходе работы актюатора.

Предложены варианты применения термомеханических актюаторов, среди которых: датчики положения и температуры, устройство защиты интегральных микросхем от электрических и/или тепловых перегрузок, системы на основе конвейерных линий термомеханических актюаторов, система контроля колебаний балочных несущих конструкций технологических космических аппаратов, система управления положением функциональной поверхности, а также микроробототехническое устройство с клеящим слоем на основе «сухого адгезива». Рассмотренные варианты отличаются от аналогов, в первую очередь, малыми массогабаритными параметрами, а также высоким ресурсом работы.

В четвертой главе представлены результаты проведенных по разработанным методикам экспериментальных исследований, направленных на изучение влияния внешних дестабилизирующих факторов и конструкционных параметров термомеханических актюаторов на их силовые и термодформационные характеристики как в статике, так и в динамике.

Для проведения экспериментов были изготовлены несколько партий термомеханических актюаторов. Каждый из актюаторов состоял из 30 и более канавок, заполненных полиимидом, габариты актюатора составили приблизительно 15х3х0,18 мм.

Результаты исследований можно разделить на следующие категории.

Исследование термодформационных характеристик. Подтверждены линейные формы зависимостей деформации актюатора от температуры его нагрева и подаваемого напряжения (при нагреве до 500 К).

Напыление дополнительного алюминиевого слоя на верхнюю сторону актюатора способствует защите полиимида от влияния факторов космического пространства и незначительно сказывается на его характеристиках.

Уменьшение толщины полиимидного слоя со стороны кремния не сказывается на термодформационных характеристиках, в то время как уменьшение толщины со стороны полиимида приводит к резкому ухудшению характеристик актюатора.

Таким образом, определено, что с точки зрения направленного регулирования термодформационных характеристик термомеханических актюаторов, важнейшую роль играет толщина полиимидного слоя в упруго-шарнирной области. Изменением толщины возможно в широком пределе регулировать как первоначальный угол отклонения актюатора, так и угол его отклонения при изменении температуры.

Исследование термоэлектрических характеристик. Значение мощности, потребляемой актюатором, не превышает 1 Вт. Определено распределение температуры на актюаторе при работе от электрического напряжения, тепло

концентрируется в центре актюатора и распределено по длине деформируемой зоны с расхождением в 18 %.

Проведено исследование влияния температуры на электрические характеристики кремниевых нагревательных элементов, результатом которого стал вывод о том, что режим работы актюатора следует определять граничной температурой в 500 К. При заданной температуре наблюдается резкое изменение сопротивления кремния – происходит падение сопротивления за счёт резкого увеличения концентрации носителей заряда в кремнии, что приводит к перегреву структуры.

В связи с этим разработано предложение по оптимизации рабочего цикла, что позволяет термомеханическому актюатору функционировать в диапазоне температур, близком к критическому для полиимида в 673 К, что, в свою очередь, увеличивает термдеформационные характеристики и частоту срабатывания актюатора.

Предложение основано на использовании режима работы с ограничением по току, подаваемому на актюатор. Удаётся добиться максимального угла отклонения актюатора при сохранении начальной деформации в условиях отсутствия нагрузок, что невозможно достичь при стандартном питании. Наглядно работу актюатора демонстрирует график на рисунке 2.

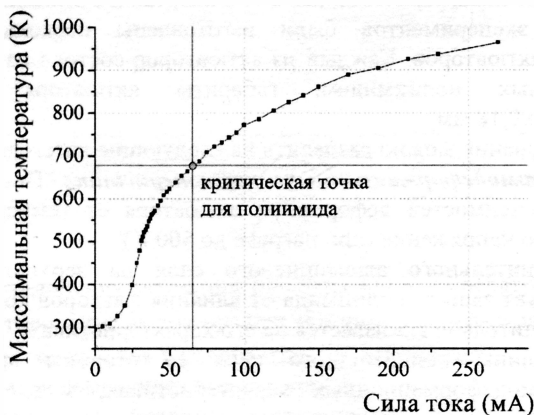


Рисунок 2. Влияние силы тока на максимальную температуру на актюаторе

Также разработан режим работы актюатора, позволяющий увеличить частоту его срабатывания. Рабочий цикл актюатора в этом случае состоит из двух этапов. На первом этапе формируется прямоугольный импульс амплитудой 30 В (с ограничением по току много большим рабочего) и длиной, достаточной для нагрева тела до критической температуры, который определяется экспериментально или приближённо посредством расчётов. На втором этапе ограничение по току ступенчато уменьшается до значения, соответствующего значению тока при заданной температуре (рисунок 2). Данное решение

позволяет увеличить скорость нагрева актюатора более чем в два раза, при этом слой полиимида не теряет свои термдеформационные свойства.

Установлено, что при температурах, близких к критической для полиимида, происходит усадка полиимида (при температурах выше технологической температуры имидизации), в результате чего начальный угол отклонения хвостовика актюатора несколько увеличивается, при этом динамический угол отклонения сохраняется. Для решения данной проблемы предложено проводить отжиг актюатора в печи, либо в результате «холостой» его работы в течение определённого времени (определяется экспериментально: чем больше, тем стабильнее начальный угол отклонения в результате дальнейшей работы актюатора). При наличии датчика обратной связи по положению актюатора, возможно также решить эту проблему, каждый раз задавая текущим положением актюатора.

Исследование динамических характеристик. Проведено исследование изменения угла отклонения и температуры на актюаторе во времени (рисунок 3).

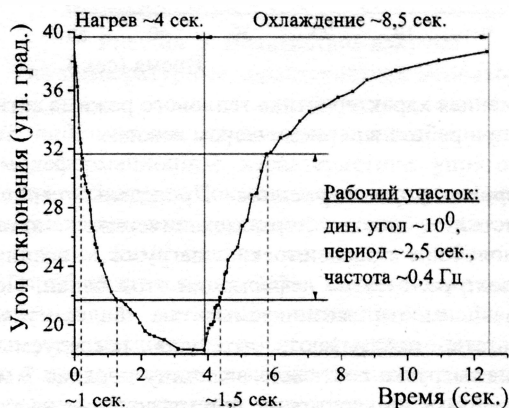


Рисунок 3. Временная характеристика работы актюатора при воздействии напряжения 20 В

Для оптимизации работы термомеханического актюатора предложено использовать уменьшенный рабочий диапазон, обеспечивающий более высокую скорость отклика системы на воздействие электрического напряжения. Так, время на нагрев снижается в 4 раза, а остывание происходит быстрее в 6 раз (соответствует частоте работы актюатора в 0,4 Гц), при этом динамический угол уменьшается всего лишь в 2 раза.

Проблема при работе в уменьшенном диапазоне заключается в реализации алгоритма управления подобной схемы, а также необходимости наличия обратной связи по температуре или по перемещению актюатора. Поэтому разработан периодический режим работы актюатора (рисунок 4), позволяющий

расширить рабочий диапазон температур до 673 К и увеличить скорость работы актюатора в 2,5 раза и более при увеличении диапазона перемещений в 1,4-1,7 раза, при этом отсутствует необходимость в обратной связи при выходе на стабильный режим работы.

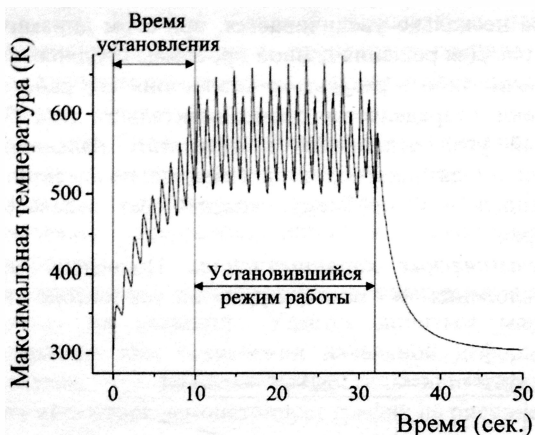


Рисунок 4. Временная характеристика теплового режима актюатора при работе в периодическом режиме

Исследование силовых характеристик. Проведены серии измерений силовых характеристик балок термомеханических актюаторов и экспериментально получены зависимости нагрузок, возникающих на хвостовике балки актюатора, от угла деформации этой балки. Подтверждены линейные формы зависимости возникаемых на балке усилий от её перемещения. Результаты показывают, что для исследуемых образцов максимальное значение нагрузки составило величину порядка 5 мН. С ростом толщины алюминия нагрузки на хвостовике при отклонении на заданный угол практически не меняются. Утонение кремния, входящего в структуру актюатора, обуславливает экспоненциальное уменьшение нагрузки относительно первоначального угла отклонения в 9 раз, что позволяет рассматривать данный процесс как один из способов регулирования нагрузки на балках термомеханических актюаторов.

Исследование влияния пониженного атмосферного давления. Проведены серии экспериментальных исследований, позволяющих установить влияние пониженного атмосферного давления на характеристики термомеханических актюаторов (рисунок 5).

Установлено, что основное влияние пониженное атмосферное давление оказывает в диапазоне от 40 до 0,5 Па, в котором наблюдается увеличение температуры на актюаторе на 24,8 %. Общее же увеличение температуры при задании давления в 10^{-3} Па составило 32,5 К (30,5 %). При понижении давления

наблюдается увеличение скорости нагрева и уменьшение скорости охлаждения структуры актюатора. Тем самым, термомеханический актюатор показал свою работоспособность при пониженном атмосферном давлении. Данная оценка особенно полезна и необходима при использовании термомеханического актюатора в условиях открытого космического пространства, когда влияние конвективной составляющей на процессы теплообмена в структуре минимально, либо отсутствует вовсе.

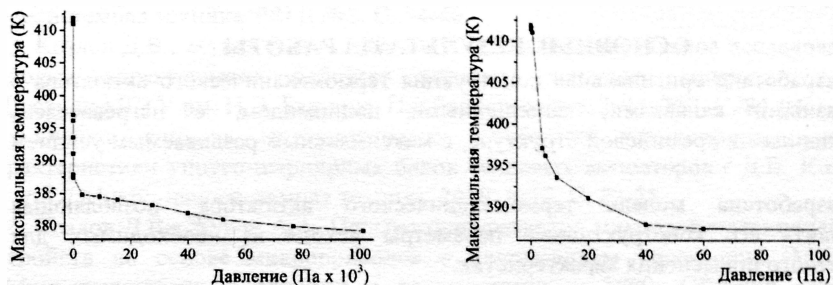


Рисунок 5. Воздействие вакуума на температурные характеристики актюатора

Исследование надёжности. Проведена оценка влияния многоциклового изгиба на термомеханические характеристики упруго-шарнирных балок термомеханических актюаторов показывающая, что угол термомеханической деформации при нагревании термомеханического актюатора после усталостных циклических испытаний в течении 5×10^6 циклов снижается приблизительно на 17 %, а после $3,2 \times 10^7$ – приблизительно на 26%. Также эксперименты показали, что усилия, возникаемые на актюаторе снизились в 2 раза относительно первоначального угла отклонения после 14 миллионов циклов. Полученные данные говорят о предсказуемом и не критическом изменении характеристик актюатора во времени, что является положительным моментом и может быть учтено при разработке схемы его управления.

Сравнение экспериментальных результатов с эквивалентными результатами численной модели показало сходимость характеристики угол отклонения – максимальное перемещение хвостовика, а также динамики нагрева актюатора. Погрешность при расчёте показаний деформации термомеханического актюатора при работе от электрического напряжения – 10 %. Погрешность задания величины напряжения составила 15,2 %. Установлено, что поведение актюатора в условиях пониженного атмосферного давления при моделировании соответствует экспериментальным полученным результатам, погрешность изменения температурных характеристик актюатора составила 6,2 %, силовых – 6 %.

Полученные данные важны и необходимы для дальнейшего изучения термомеханических актюаторов, дают возможность создания их с заранее заданными характеристиками, позволяют расширить и более точно

представлять области их применения и подтверждают тот факт, что именно биморфный тип актюаторов с V-образными канавками обладает наибольшими значениями нагрузок среди известных аналогов. Проведённые испытания позволяют дополнить картину возможностей термомеханических актюаторов, акцентируя внимание на высокой стабильности характеристик подвижных балок.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана оригинальная конструкция термомеханического актюатора с V-образными канавками, заполненными полиимидом, с нагревателем, выполненным в кремниевой структуре, с максимальным развиваемым усилием 5 мН.

2. Разработана модель термомеханического актюатора, позволяющая установить его конструктивные параметры исходя из необходимых для конкретного применения характеристик.

3. Разработаны методики измерения термдеформационных, силовых, электрических и термодинамических характеристик термомеханических актюаторов, отличающиеся возможностью производить измерения объектов микроминиатюрных размеров с высокой точностью, определять температурный коэффициент линейного расширения полиимида, используемого в конструкции, а так же исследовать объекты в условиях пониженного атмосферного давления.

4. Разработан групповой метод ускоренных усталостных испытаний термомеханических актюаторов, позволяющий в короткие сроки определить примерное время наработки до отказа и влияние «старения» на характеристики актюаторов. Установлено, что время приработки актюатора составляет примерно 100 циклов работы в реальных условиях эксплуатации после его изготовления.

5. Разработаны предложения по оптимизации рабочего цикла термомеханических актюаторов, позволяющие, работая в уменьшенном диапазоне, увеличить частоту срабатывания в 5 раз (до 0,4 Гц), работая в периодическом режиме, расширить диапазон рабочих температур до 673 К и увеличить за счёт этого скорость работы в 2,5 раза при расширении диапазона перемещений в 1,4-1,7 раза.

6. Экспериментально подтверждена работоспособность термомеханических актюаторов в условиях пониженного атмосферного давления.

7. Показано, что термомеханические актюаторы выдерживают 32 и более миллионов циклов срабатывания при предсказуемом изменении характеристик.

8. Полученные результаты экспериментов свидетельствуют о возможности применения термомеханических актюаторов в системах, используемых в открытом космосе.

ТЕМА ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНА В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. Влияние армирования полиимидного слоя одностенными углеродными нанотрубками на термдеформационные характеристики полиимид-кремниевых балок тепловых микроактюаторов / Д.В. Козлов [и др.] // Материаловедение. 2011. №9. С. 43-46.
2. Влияние условий формирования и толщины слоев на термдеформационные характеристики полиимид-кремниевых упруго-шарнирных балок тепловых актюаторов / Д.В. Козлов [и др.] // Микро-наносистемная техника. 2011. №2. С. 34-40.
3. Козлов Д.В., Жуков А.А., Смирнов И.П. Экспериментальное исследование силовых характеристик рабочего элемента тепловых микроактюаторов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Приборостроение. 2011. №2. С. 84-94.
4. Оценка влияния многоциклового изгиба на термдеформационные характеристики упруго-шарнирных балок тепловых актюаторов / Д.В. Козлов [и др.] // Микро-наносистемная техника. 2010. №12. С. 22-25.
5. Козлов Д.В., Жуков А.А. Перспективы развития микроробототехнических устройств на основе микроприводов с напряжением управления (МПНУ) // Микротехнологии в авиации и космонавтике – 2009: Сборник тезисов докладов VII всероссийской научно-практической конференции. – М., 2009. С. 29-30.
6. Методика измерений деформационных характеристик микроактюаторов / Д.В. Козлов [и др.] // Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий – 2009: Труды II всероссийской научно-технической конференции. – М., 2010. С. 228-233.
7. Козлов Д.В., Жуков А.А., Смирнов И.П. Методика измерения и оценки нагрузочных способностей балок тепловых актюаторов // Микротехнологии в космосе – 2010: Сборник тезисов докладов VIII всероссийской научно-технической конференции. – М., 2010. С. 30.
8. Козлов Д.В. Анализ методов исследования термомеханических актюаторов для систем микроперемещений // Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий – 2011: Сборник тезисов докладов IV всероссийской научно-технической конференции. – М., 2011. С. 299-301.
9. Моделирование термомеханических актюаторов для систем микроперемещений / Д.В. Козлов [и др.] // Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий – 2011: Сборник тезисов докладов IV всероссийской научно-технической конференции. – М., 2011. С. 306-307.
10. Система терморегулирования поверхности и бортовой аппаратуры малых космических аппаратов на основе конвейерных линий тепловых актюаторов / Д.В. Козлов [и др.] // Всероссийский фестиваль науки – 2011: Сборник материалов международного молодежного форума «Дорога к звёздам». – Королёв, 2011. С. 9-10.

11. Козлов Д.В., Бойко А.О. Исследование динамических характеристик теплового микроэлектромеханического актюатора // Научно-технические системы – 2012: Сборник трудов XIV молодежной международной научно-технической конференции. – М., 2012. С. 214-217.

12. Исследование термодформационных и электрических характеристик микроэлектромеханических актюаторов в условиях пониженного атмосферного давления / Д.В. Козлов [и др.] // Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий – 2012: Сборник тезисов докладов V всероссийской научно-технической конференции. – М., 2012. С. 184-185.

Патенты и заявки на патенты:

1. Пат. 2448896 РФ, МПК2012 В81В 3/00, В81С 1/00, В81В 7/00. Тепловой микроэлектромеханический актюатор и способ его изготовления / Д.В. Козлов (RU), И.П. Смирнов (RU), А.А. Жуков (RU) и др.; ОАО «Российские космические системы» (RU). – Заяв. 25.03.2012; Оpubл. 27.04.2012, Бюл. №12. – 20 с.

2. Заявление о выдаче патента РФ 2011109331. Микросистемное устройство управления поверхностью для крепления малогабаритной антенны / Д.В. Козлов (RU), А.А. Жуков (RU), И.П. Смирнов (RU) и др.; ОАО «Российские космические системы» (RU). – Заяв. 11.03.2011; Решение о выдаче патента 04.04.2012. – 19 с.

3. Заявление о выдаче патента РФ 2011142205. Микросхема с микроэлектромеханической защитой от электрических и/или тепловых перегрузок / Д.В. Козлов (RU), С.Д. Заводсков (RU), А.А. Жуков (RU); ОАО «Российские космические системы» (RU). – Заяв. 18.10.2011; Решение о выдаче патента 24.05.2012. – 14 с.

Автор выражает благодарность и признательность доктору технических наук Жукову Андрею Александровичу за оказанную всестороннюю помощь в научном консультировании при подготовке работы.