

УДК 678.7

МОБИЛЬНЫЙ МИКРОРОБОТ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ: КОНЦЕПЦИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

© 2019 г. Н. Н. Болотник¹, *, В. Г. Градецкий¹, А. А. Жуков¹, Д. В. Козлов¹,
И. П. Смирнов¹, В. Г. Чашухин¹

¹Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, г. Москва, Россия

*bolotnik@ipmnet.ru

Поступила в редакцию 08.06.2017 г.

После доработки 20.03.2018 г.

Принята к публикации 30.03.2018 г.

Представлен краткий обзор достижений в области микроробототехники. Сформулированы задачи, которые могут выполняться мобильными микророботами в космосе, и соответствующие требования к конструктивным и эксплуатационным характеристикам таких микророботов. Предложена концепция мобильного космического микроробота с термомеханическими кремниевыми-полиимидными актюаторами. Дается предварительная оценка принципиальной и технологической реализуемости этой концепции.

DOI: 10.1134/S0023420619020018

ВВЕДЕНИЕ

Применение робототехнических устройств необходимо в тех условиях, когда непосредственное участие человека невозможно или нежелательно. Такие условия возникают, в частности, в космическом пространстве, освоение которого стало возможным благодаря развитию автоматических космических аппаратов. При этом для ряда задач, которые необходимо решать без участия человека на данном этапе развития космической техники, возникает необходимость создания и применения микророботов. К таким задачам относятся: инспекция труднодоступных областей космических аппаратов и станций (как внутри аппарата, так и в открытом космосе), удаленное наблюдение, выполнение напланетных миссий в части перемещения по поверхности планеты для наблюдения и сбора грунта, манипулирование микрообъектами, микропозиционирование узлов и модулей аппаратов. Микророботы, производимые групповыми методами микротехнологий, имеют малые габариты и массы. Стоимость изготовления и доставки таких роботов невелика, а функциональные возможности могут варьироваться в значительных пределах. Поэтому задача создания микророботов для космических применений становится весьма актуальной.

Цель работы — новая концепция мобильного микроробота космического назначения и оценка технической реализуемости его создания.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: провести анализ

уровня техники мобильных микророботов; предложить новую концепцию мобильного микроробота космического назначения; провести анализ воздействия факторов открытого космического пространства на конструкцию и материалы мобильного микроробота для орбиты МКС и дать теоретическую оценку технической реализуемости мобильного микроробота космического назначения.

1. МОБИЛЬНЫЕ МИКРОРОБОТЫ

Термин “микроробототехника” обычно охватывает робототехнические системы, отдельные компоненты которых имеют размеры в интервале от нескольких микрометров до нескольких десятков микрометров, а модули, приводы и блоки имеют размеры в интервале от нескольких миллиметров до нескольких десятков сантиметров [1, 2]. Миниатюризация механических управляющих устройств и приводов, разработка микроэлектромеханических систем (МЭМС) для автоматизации и обработки данных и развитие производственных технологий для МЭМС сделали возможным создание мини- и микророботов [3]. Приводы этих роботов могут основываться на различных физических принципах действия, например, используются пьезоэлектрические, электростатические, термомеханические, электромагнитные, магнитострикционные, реактивные силы и др. [2, 4]. Приводы, действие которых основывалось на электростатических силах, создавались для систем управления миниатюрными зеркалами, используемых в кос-

мическом корабле [5, 6] или для солнечных батарей космических аппаратов [7]. Ряд совместных экспериментов по изучению природы статического взаимодействия микророботов с поверхностями был выполнен в Университете Карнеги — Меллон (Carnegie Mellon University), в Бостонском университете (Boston University), США [5], в Токийском университете (Tokyo University) в Японии [8], в Королевском Техническом Университете Стокгольма (Royal Institute of Technology) [9]. В Калифорнийском университете (California University), Университете Пердью (Perdu University) и Бостонском университете (Boston University) в США изучались силы, действующие в мобильных микророботах с пьезоэлектрическими актюаторами [2, 4, 5, 10, 11]. Эти работы связаны с созданием микророботов вертикального перемещения. Микроробот Микроид (Microid) [10] включает в себя подвижные пьезоэлектрические элементы, устройство управления (контроллер) и источник энергии. Пьезоэлектрические приводы могут осуществлять перемещение микроробота на плоскости в четырех направлениях. Микроробот имеет шесть приводов на боковых сторонах транспортной платформы и два привода в задней части. Это позволяет микророботу двигаться вдоль прямой линии и разворачиваться. Длина шага микроробота — 200 мкм при поданном на приводы напряжении в 40 В. Зазор (клиренс) между микророботом и поверхностью, по которой он движется, — не менее 100 мкм. Максимальная нагрузка на один привод — 0.8 мН. Недостаток этого микроробота заключается в том, что он требует сложной технологии производства, с необходимостью надежной диэлектрической защиты от высоковольтного пробоя, со сложностью расположения источника питания высокого напряжения. Кроме того, способность перемещаться по неровным или ступенчатым поверхностям у этого микроробота ограничена.

Использование термомеханических приводов может существенно улучшить рабочие характеристики микророботов. Ввиду этого термомеханические приводы привлекают все большее внимание ученых и инженеров. Принципы движения миниатюрных шагающих роботов с термомеханическими приводами и управления такими роботами исследуются в работах [9, 12–17]. Ожидается, что миниатюрные роботы с термомеханическими приводами будут иметь улучшенные динамические характеристики и повышенную грузоподъемность. Сконструировано большое количество устройств с различными принципами действия и функциональными характеристиками, которые подтверждают перспективность использования термомеханических приводов в микроробототехнике. Конструкцией, которая наиболее полно удовлетворяет требованиям, предъявляемым к шагающим микророботам, является привод с V-образными полии-

мидными соединениями, предложенный шведскими учеными [9, 18]. Подобные системы также разработаны в Японии (биморфные структуры на основе термомеханических и электростатических эффектов [8]), в США (микророботы с термомеханическими приводами [4, 10, 11]), и в других странах. Микроробот с термомеханическим приводом [18] может перемещаться по различным поверхностям и при этом нести нагрузку, во много раз превосходящую его массу. Конструкция микроробота включает в себя два комплекта термомеханических биморфных актюаторов. Актюаторы расположены крестообразно группами по четыре и соединены шинами с проводящими дорожками. Актюаторы играют роль ног микроробота и включаются/выключаются поочередно, что позволяет роботу двигаться. Термомеханические актюаторы формируются из двух материалов (полиимида и кремния) с различными коэффициентами теплового расширения. Микроробот может перемещаться в четырех направлениях со скоростью до 0.25 мм/с с полезной нагрузкой в 7 раз большей, чем собственная масса. Основные недостатки микроробота состоят в том, что он не может двигаться по наклонным или искривленным поверхностям, что балки актюатора могут деформироваться лишь на небольшую величину, и что скорость движения микроробота невысока.

Шагающий микроробот [9] представляет из себя устройство, выполненное на кремниевой подложке, с двумя комплектами термомеханических актюаторов. Актюаторы формируются в подложке и имеют V-образные канавки, заполненные фоточувствительным полиимидом. Микроробот может перемещаться по плоскости в двух направлениях со скоростью до 6 мм/с. Приводы могут выдерживать более 200 миллионов рабочих циклов, что позволяет микророботу преодолевать расстояние не менее 7 км. Микроробот может нести полезную нагрузку, масса которой превосходит массу самого микроробота более чем в 30 раз.

Микроробот в виде “шестиногой” конструкции предложен в [11]. Микроробот снабжен ногами, которые расположены в два ряда по три ноги в каждом. Ноги закреплены в направляющих, оси которых перпендикулярны поверхности движения микроробота. Каждая нога содержит термомеханический актюатор, который может перемещаться в опорной поверхности в двух направлениях, соответствующих движению робота вперед и назад. Приводы управляются путем подведения к ним напряжения с определенной частотой. Когда приводы работают синхронно, робот движется вперед или назад по прямой линии. Изменяя порознь управляющую частоту в каждом ряду ног, можно добиться движения микроробота по криволинейной траектории. Микроробот имеет массу 3.8 г, он может двигаться со скоростью до 1.55 мм/с и нести нагрузку в 9 г.

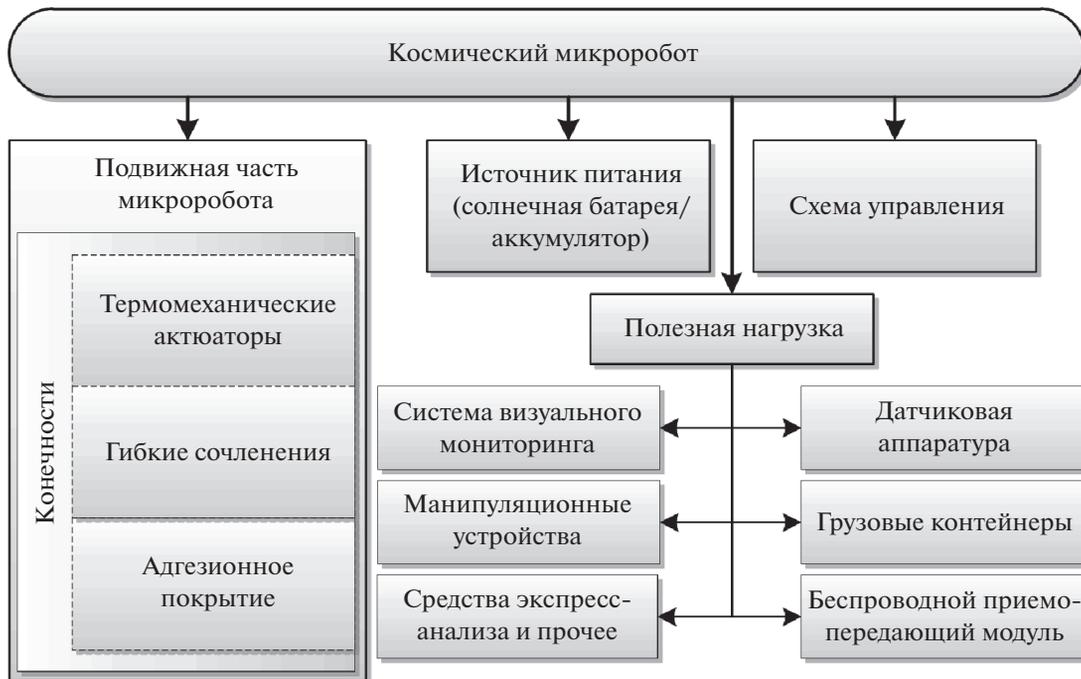


Рис. 1. Блок-схема мобильного микро робота космического назначения.

Несмотря на значительный интерес к космической микро робототехнике, наблюдающийся в последние годы, успехи ее практического использования довольно скромны, хотя перспективы представляются многообещающими [3, 7]. Первые публикации, касающиеся использования микро роботов в космических технологиях, появились в конце восьмидесятых годов прошлого века [5, 7]. Ученые в различных странах проявляют интерес к фундаментальным исследованиям в области механики микро роботов. Этот интерес, в частности, объясняется потребностью в создании миниатюрных мобильных микро роботов для производства разнообразных технологических операций в сложных средах и условиях [6, 8]. Анализ публикаций позволяет сделать вывод, что дальнейший прогресс в космической микро робототехнике требует проведения фундаментальных и прикладных исследований по следующим направлениям: изучение принципов функционирования микро роботов и выбор подходящих принципов с учетом конкретных задач, выполняемых микро роботом в космосе; анализ влияния факторов космического пространства на поведение микро роботов; разработка математических моделей микро роботов, а также методов их проектирования и оптимизации параметров; динамическое моделирование роботов с анализом сил и моментов, действующих в конструкции; совершенствование технологической и экспериментальной базы.

2. МОБИЛЬНЫЙ МИКРО РОБОТ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Предложена концепция мобильного микро робота космического назначения шагающего типа, подвижная часть которого выполнена на основе управляемых термомеханических актюаторов [19–21]. Блок-схема микро робота показана на рис. 1.

В состав микро робота входят источник питания (солнечная или аккумуляторная батарея), схема управления движением и вспомогательными функциями робота и полезная нагрузка, расположенные на подвижной части микро робота. Полезная нагрузка зависит от задачи, решаемой микро роботом. Например, если робот выполняет визуальное наблюдение, он должен быть снабжен видеокамерой и системой обработки изображений. Для расширения сенсорных возможностей микро робота и формирования сигналов обратной связи в каналах управления микро робот необходимо снабдить различного типа датчиками (расстояния, освещенности, температуры, тактильными). Для перемещения грузов или контактного воздействия на окружающую среду микро робот может быть оснащен бортовыми манипуляторами [22, 23]. Связь микро робота с внешним оператором и дистанционное управление могут осуществляться с помощью беспроводных приемопередающих устройств, выполненных на интегральных схемах. В зависимости от полезной нагрузки и задач, которые решает микро робот, могут предъявляться различные требования к управляю-

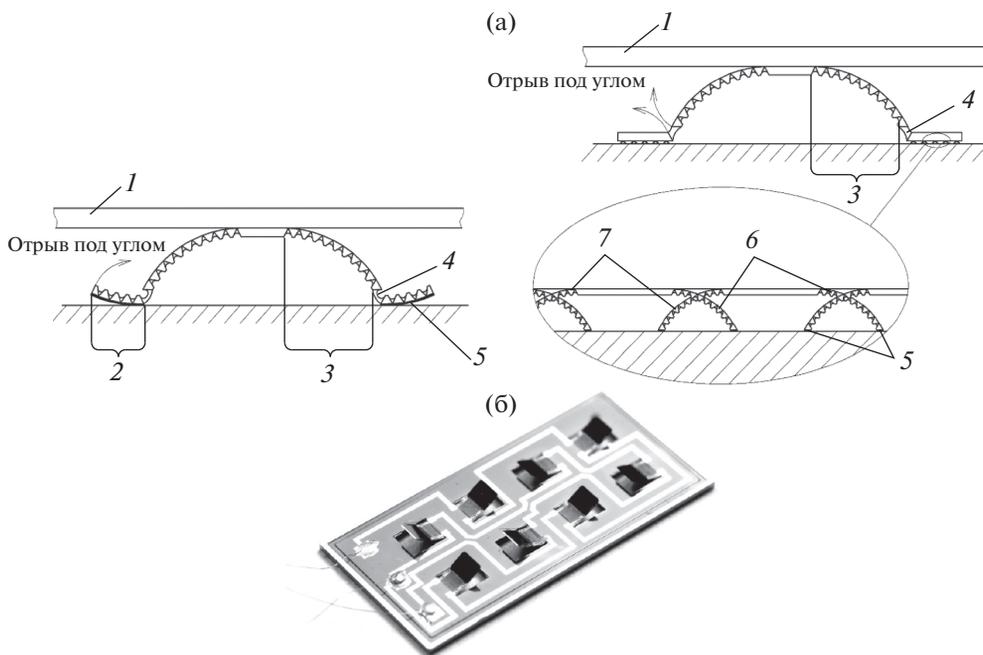


Рис. 2. Предложенная (а), спроектированная и реализованная (б) подвижная часть микробота: 1 – основание с полезной нагрузкой; 2 – подвижная зона прилипания/отлипания; 3 – основная подвижная зона; 4 – гибкое сочленение; 5 – адгезив; 6, 7 – актюаторы дополнительной подвижной зоны.

щим устройствам, в частности может понадобиться различное количество интерфейсов и каналов управления, различная выходная мощность приводов и различная скорость обработки информации. Для уменьшения размеров системы предлагается все сенсорные и управляющие устройства выполнять в виде сверхбольших интегральных схем (СБИС), которые следует или размещать на поверхности подвижной части или интегрировать в нее. Основным компонентом микробота служит подвижная часть (рис. 2).

В качестве исполнительных элементов подвижной части микробота предложено использовать термомеханические актюаторы, принцип действия которых основан на явлении термической деформации твердых тел [9, 14, 15, 18]. Актюаторы изготавливаются из кремниевых балок прямоугольного сечения, в которых выполнены V-образные канавки. Эти канавки заполняются полипиромеллитимидом (полиимидом), более стойким к термоокислению по сравнению с фотополиимидом [24]. Кремний и полимер жестко связываются друг с другом благодаря адгезии. Кремний и полиимид имеют существенно различающиеся коэффициенты термического расширения. Так как вставки имеют V-образную форму, абсолютное удлинение верхней (более широкой) части вставки вследствие термического расширения больше абсолютного удлинения нижней части, вследствие чего балка актюатора изгибается [14, 15]. Актюаторы могут иметь несколько зон де-

формации, что позволяет изгибать их в нескольких направлениях. Полимерные вставки могут быть гибкими, что позволяет создавать шарниры, в которых практически отсутствует механическое напряжение, но которые сохраняют кинематическую целостность конструкции. Каждый актюатор выполняет роль конечности (ноги). Ноги расположены двумя параллельными рядами; в каждом ряду минимум три ноги. Система управления ногами имеет два независимых канала, что позволяет реализовывать предписанные походки. Для обеспечения удерживающего контакта с поверхностью перемещения хвостовик (стопа) каждой ноги предлагается в одном из возможных вариантов конструкции снабдить “сухим” адгезивным материалом, состоящим из множества микроскопических ворсинок, составляющих определенный угол с контактной поверхностью. Адгезив позволит осуществлять надежный множественный контакт ног с поверхностью перемещения в условиях невесомости, причем поверхность может иметь различную структуру и степень шероховатости. Анализ взаимодействия адгезивного материала с поверхностью показывает, что на стадии приведения покрытия в адгезионный контакт с поверхностью, ключевую роль играют упругие характеристики материалов микроворсинок и поверхности, а на стадии отрыва определяющим фактором является поверхностное натяжение. Обе эти стадии могут контролироваться выбором соответствующих материалов для контактных поверхностей [25–27]. Бы-

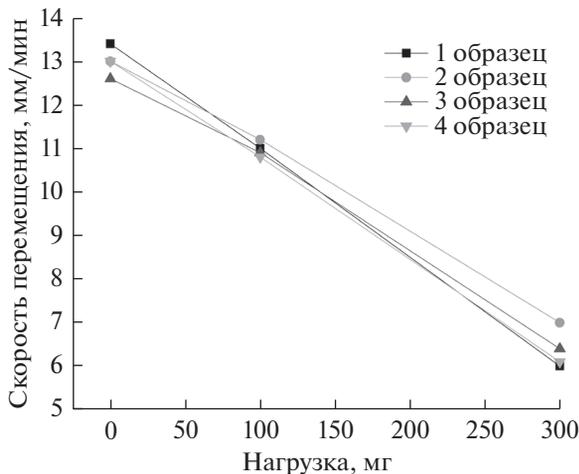


Рис. 3. Характеристики движения подвижной части микроробота под воздействием нагрузки.

ли спроектированы, изготовлены и испытаны подвижные части микроробота (рис. 2). Целью испытаний являлось определение деформационных характеристик исполнительных компонентов подвижной части микроробота при внешнем управляющем сигнале и при воздействии внешних усилий. Так как устройство предполагается использовать в условиях космического пространства при наличии микрогравитации, а также для уменьшения влияния жесткости проводников, которые соединяют устройство с лабораторным оборудованием измерительного стенда, устройство испытывали в режиме конвейера следующим образом: микроробот закрепляли на неподвижном основании таким образом, что стопы были обращены кверху. На стопы микроробота помещали пластинку определенной массы, которая перемещалась с помощью актюаторов. В результате эксперимента установлено, что полученные образцы функционируют от напряжения до 3.7 В. Среднее значение электрического сопротивления на каналах актюаторов составило 13.4 Ом. Мощность, потребляемая подвижной частью микроробота, оценивается величиной порядка 0.225 Вт, что соответствует мощности, вырабатываемой арсенид-галлиевой солнечной батареей площадью 12.5 см², в 10 раз превышающей площадь поверхности мобильного микроробота. Учитывая, что микроробот будет эксплуатироваться в космосе и что часть энергии может быть запасена в аккумуляторных батареях, предлагаемая концепция мобильного космического микроробота представляется реализуемой. Подвижную часть микроробота испытывали на функционирование без нагрузки и под нагрузкой от 100 до 300 мг (рис. 3). Испытаниям подвергали 4 образца одного типоразмера.

При нагрузке более 300 мг наблюдалось заметное снижение скорости перемещения устройства.

Максимальная масса, выдерживаемая подвижной частью микроробота (за счет упругих сил актюаторов) без перемещения, составила 1.5 г. Это означает, что нагрузка менее 0.015 Н не приводит к разрушению устройства. Наибольшая скорость перемещения подвижной части микроробота составляет величину 13.4 мм/мин и достигается при частоте работы “ног” на основе термоактюаторов 1.25 Гц. Один цикл алгоритма перемещения [20] подвижной части микроробота равен 0.8 с; в течение этого времени устройство совершает подачу четырех импульсов на каналы управления, и каждые два из них формируют единичный шаг перемещения, то есть шаг перемещения длится 0.4 с. Таким образом, цикл работы микроробота содержит два шага перемещения. Сравнивая полученные данные по движению подвижной части микроробота с более ранним аналогом, построенным на актюаторах большего размера [20], приходим к выводу, что уменьшение размеров положительно сказывается на характеристиках перемещения: скорость перемещения возрастает незначительно (в среднем в 1.3–1.5 раза), но если рассматривать скорость перемещения относительно общих габаритов подвижной части микроробота, то разница составляет десятки раз. Масса подвижной части микроробота без учета соединительных кабелей составила величину 65.5 мг при габаритах в плане 15.5 × 7.5 мм. Экспериментально установлено, что влияние нагрузки менее 100 мг на параметры движения устройства незначительно. Поэтому испытания, проводимые в режиме конвейера, не оказывают принципиального влияния на достоверность полученных данных. Результаты испытаний в целом будут верны и для условий эксплуатации в космосе при малых значениях гравитационных сил. По сравнению с аналогичной системой конвейерного перемещения на тепловых актюаторах большего размера [20], масса разработанной подвижной части микроробота уменьшена более чем в 1000 раз благодаря изготовлению на единой подложке в едином технологическом цикле, а также уменьшению массогабаритных характеристик актюаторов.

3. АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСТВИЯ ФАКТОРОВ ОТКРЫТОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА НА МОБИЛЬНЫЙ МИКРОРОБОТ ДЛЯ ОРБИТЫ МКС И ОЦЕНКА ЕГО ТЕХНИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗУЕМОСТИ

В составе предложенной подвижной части микроробота применены следующие материалы [14, 15]: монокристаллический кремний с ориентацией [100], полипиромеллитимид, полученный из полиамидокислоты растворными методами с последующей термоимидизацией при температуре 300–320°C, алюминиевое покрытие. Анализ

данных о работоспособности подвижной части микроробота в условиях воздействия открытого космического пространства орбиты *МКС* представлен в [24, 28–30]. При этом проведение натурных испытаний на *МКС* наиболее адекватно и достоверно позволит исследовать работоспособность в сравнении с имитационными испытаниями на Земле, что неоднократно показано рядом исследователей в части воздействия дестабилизирующих факторов космического пространства в совокупности как на материалы, так и на приборы космического назначения [30, 31].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена концепция космического мобильного микроробота с термомеханическими кремниевыми-полиимидными актюаторами. Мобильный микроробот включает в свой состав подвижную часть, служебную систему, включающую источник питания (солнечная или аккумуляторная батарея), схему управления движением и вспомогательными функциями микроробота и полезную нагрузку. По предварительным оценкам космический микроробот может быть реализован: подвижная часть с применением микросистемных технологий, схема управления движением и вспомогательными функциями микроробота – например, на основе технологии кремний-на-изоляторе (КНИ). Экспериментально испытана подвижная часть микроробота. Показано, что максимальная масса, выдерживаемая подвижной частью микроробота (за счет упругих сил актюаторов) без перемещения, составляет 1.5 г (т.е. нагрузка менее 0.015 Н не приводит к разрушению устройства), а наибольшая скорость перемещения подвижной части микроробота – 13.4 мм/мин при частоте работы актюаторов 1.25 Гц. Среднее значение массы подвижной части микроробота без учета соединительных кабелей составляет 65.5 мг при габаритах в плане 15.5 × 7.5 мм. Масса подвижной части пренебрежимо мало влияет на характеристики ее движения. Материалы подвижной части микроробота – (полипиромеллитимид, монокристаллический кремний, алюминий) работоспособны в условиях дестабилизирующих факторов космического пространства. Предложено реализовать защиту полиимида пленкой на основе нитрида кремния (0.2–0.3 мкм), сформированной на поверхности полиимида, а схему управления движением и вспомогательными функциями и полезную нагрузку – на основе технологии КНИ. Микророботы могут осуществлять мониторинг и обслуживание космических аппаратов, в частности, орбитальных космических станций.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 14–19–00949).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dario P., Valleggi R., Carrozza M. et al.* Review – Microactuators for Microrobots: A Critical Survey // *J. Micromechanics and Microengineering*. 1992. № 2(3). P. 141–157.
2. *M.G. el Hak (ed.)* The MEMS Handbook. B. Raton. CRC Press, 2002.
3. *Градецкий В.Г., Князьков М.М., Фомин Л.Ф., Чаушун В.Г.* Механика миниатюрных роботов. М.: Наука. 2010.
4. *Madou H.J.* Fundamentals of Microfabrication. Science of Miniaturization. Boca Raton. CRC Press. 2002.
5. *Norton A., Evans J., Gave D. et al.* Preliminary characterization of Boston Micromachines' 4096-actuator deformable mirror // "MEMS Adaptive Optics III". Proc. SPIE. 2009. V. 7209. P. 720901–720901–7.
6. *Wallace B.P., Hampton P.J., Bradley C.H., Conan R.* Evaluation of a MEMS deformable mirror for an adaptive optics test bench // *Optics Express*. 2006. V. 14. № 22. P. 10132–10138.
7. *Brooks R.A., Flynn A.M.* Fast, cheap and out of control: a robot invasion of solar system // *J. British Interplanetary Society*. 1989. V. 42. P. 478–485.
8. *Kondon Y., Yokota S.* Micro in-pipe mobile machines by making use an electro-rheological fluid // *Proc. IROS-97*. 1997. P. 1672–1677.
9. *Ebefors T.* Polyimide V-groove Joints for Three-Dimensional Silicon Transducers. PhD thesis. Royal Institute of Technology. Stockholm. 2000.
10. *Clark J.V.* Robotic devices and methods. Patent of USA US 2012/0168233. Publ. 05.07.2012.
11. *Popa D.O., Murthy R., Das A.N., Fulbright, Jaworski L.* Microcrawler and conveyor robots, controllers, systems, and methods. Patent of USA US 2010/0145511. Publ. 10.06.2010.
12. *Erdem E.Y., Chen Y.M., Mohebbi M. et al.* Thermally Actuated Omnidirectional Walking Microrobot // *J. Microelectromechanical Systems*. 2010. V. 19. № 3. P. 433–442.
13. *Quenzer H.J., Wagner B.* Microactuator. Patent of USA US 6684638B2. Publ. 02.03.2004.
14. *Смирнов И.П., Жуков А.А., Козлов Д.В. и др.* Тепловой микромеханический актюатор и способ его изготовления. Пат. РФ 2448896. Бюллетень изобретений. 2012. № 12. Заяв. 25.03.2012.
15. *Корпунин А.С., Бабаевский П.Г., Жуков А.А. и др.* Влияние условий формирования и толщины слоев на термомеханические характеристики полиимид-кремниевых упруго-шарнирных балок тепловых актюаторов // *Нано- и микросистемная техника*. 2011. № 2. С. 34–40.
16. *Xu T.B., Cheng Z.Y., Zhang O.M.* High-performance micromachined unimorph actuators based on electrostrictive poly(vinylidene fluoride)trifluoroethylene copolymer // *Applied Physics Letters*. 2002. V. 80. № 6. P. 1082–1084.
17. *Yang W.M., Chou S.K., Shu C. et al.* Development of microthermophotovoltaic system // *Applied Physics Letters*. 2002. V. 81. № 27. P. 5255–5257.
18. *Ebefors T., Mattsson J.U., Kälvesten E., Stemme G.* A walking silicon micro-robot // 10th Int. Conference on Solid-State Sensors and Actuators (Transducers'99). Sendai, Japan, 1999. P. 1202–1205.

19. *Смирнов И.П., Козлов Д.В., Жуков А.А. и др.* Микросистемный космический робот–инспектор (варианты). Заявка на изобретение 2014108966/02 от 11.03.2014, Опубликовано: 27.10.2015 // Бюл. № 30. Патент РФ 2566454.
20. *Bolotnik N.N., Chashchukhin V.G., Gradetsky V.G. et al.* Design of mobile microrobots with thermomechanical actuators // 12th Int. Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO 2015). Colmar, France. Proceedings. V. 2. P. 252–258.
21. *Черноусько Ф.Л., Смирнов И.П., Козлов Д.В. и др.* Мобильный микроробот. Заявка: 2015102480/02 от 27.01.2015. Опубликовано: 10.09.2015. // Бюл. № 25. Полезная модель к патенту 154708.
22. *Черноусько Ф.Л., Смирнов И.П., Козлов Д.В. и др.* Манипулятор для мобильного микросистемного робота. Заявка: 2015102483/02 от 27.01.2015. Опубликовано: 10.08.2015 // Бюл. № 22. Полезная модель к патенту 153870.
23. *Черноусько Ф.Л., Смирнов И.П., Козлов Д.В. и др.* Микросистемный захват. Заявка на изобретение: 2015116296/02 от 29.04.2015. Опубликовано: 27.09.2016 // Бюл. № 27. Патент РФ 2598416.
24. *Бессонов М.И., Котон М.М., Кудрявцев В.В., Лайус Л.А.* Полиимиды – класс термостойких полимеров. Л.: Наука, 1983.
25. *Geim A.K., Dubonos S.V., Grigorieva I.V. et al.* Microfabricated adhesive mimicking gecko foot–hair // Nature Materials. 2003. № 2. P. 461. <http://www.nature.com/doi/10.1038/nmat917>.
26. *Бабаевский П.Г., Жуков А.А., Шаповал С.Ю., Гринькин Е.А.* Адгезионное взаимодействие твердых поверхностей и создание полимерных “сухих” адгезивов. Теоретические аспекты // Нано- и микро-системная техника. 2006. № 2. С. 2–8.
27. *Попов В.Л., Филиппов А.Э., Горб С.Н.* Биологические структуры с высокой адгезией и трением. Численный подход // УФН. 2016. Т. 186. № 9. С. 913–930.
28. http://www.energiya.ru/ru/iss/researches/iss_rs_guide.pdf.
29. Модель космоса: научно-информационное издание / Под ред. Панасюка М.И., Новикова Л.С. Т. 1. Физические условия в космическом пространстве. М.: КДУ, 2007.
30. Модель космоса: научно-информационное издание / Под ред. Панасюка М.И., Новикова Л.С. Том 2. Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов. М.: КДУ, 2007.
31. *Чурило И.В.* Методы дистанционного контроля и изменение и изменение диэлектрических свойств эпоксидных полимеров и композиционных материалов на их основе при длительном воздействии факторов космического пространства // Дис. ... уч. ст. к.т.н. М., 2003.