

Учреждение Российской академии наук Институт проблем механики
им. А.Ю. Ишлинского РАН

На правах рукописи
Чашухин Владислав Григорьевич

ДВИЖЕНИЕ МИНИАТЮРНОГО РОБОТА В ОГРАНИЧЕННОМ
ПРОСТРАНСТВЕ

Специальность 01.02.01 – теоретическая механика

Диссертация
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Научный руководитель: д.т.н., проф. Валерий Георгиевич Градецкий

Москва, 2008 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Оглавление	2
Введение	4
1. Основные типы механических систем роботов для движения в ограниченном пространстве и их применение	7
2. Моделирование динамики внутритрубного миниробота	18
2.1. Конструкция робота	18
2.2. Динамика движения робота	22
2.3. Моделирование динамики движения робота	26
2.4. Внутритрубный миниатюрный робот с возможностью реверсивного движения	31
2.5. Моделирование упругого упора с анизотропным трением	36
3. Наноструктурированные покрытия контактных поверхностей мобильных роботов	44
3.1. Требования к материалам для покрытия контактных поверхностей роботов	44
3.2. Сухой адгезионный материал для устройств сцепления с поверхностью в робототехнике	46
3.2.1. Биологические адгезивы	46
3.2.2. Искусственные адгезивы	54
4. Применение сухих адгезивов в устройствах сцепления с поверхностью	73
4.1. Основные характеристики устройств сцепления на основе адгезионных материалов	73
4.2. Повышение анизотропности трения при использовании адгезионных материалов	78
4.3. Технические требования к сухим адгезионным материалам для покрытия контактных поверхностей роботов	83
Заключение	88

Список литературы	91
Приложение.....	98

ВВЕДЕНИЕ

Методы механики лежат в основе расчетов систем робототехники. В робототехнике же в настоящее время наблюдается тенденция к миниатюризации и применению нанотехнологий. Миниатюрные роботы могут проникать в узкие образования (щели, отверстия) и двигаться в них, что позволяет применять их для выполнения различных задач в ограниченных пространствах, например трубах малого диаметра, имеющих размер порядка нескольких миллиметров. Конструкция минироботов зачастую сильно отличается от их макроразмерных аналогов. В качестве маршевых двигателей минироботов обычно используются двигатели, обеспечивающие линейное перемещение без использования трансмиссии, например электромагнитный или пьезоэлектрический. С помощью применения современных нанотехнологий можно улучшить технические характеристики как отдельных узлов миниробота, например устройств сцепления с поверхностью, так и робота в целом.

Миниатюрные роботы для движения в трубах малого диаметра имеют довольно обширную область применения. В основном это техническая диагностика трубопроводов, дефектоскопия внутренних поверхностей труб в авиационной, космической, атомной промышленности и т. д. Кроме того имеется потребность в осуществлении прокладки кабелей в трубах и картографировании трубопроводов.

Несмотря на выполненные ранее исследования в области механики роботов, влияние рабочих параметров на функциональные характеристики таких роботов изучено недостаточно, известные методы расчета не обеспечивают достаточно точное соответствие с экспериментом.

Актуальность темы исследования заключается в необходимости выполнения параметрического анализа и нахождения зависимостей между

основными параметрами, в разработке адекватных процессам механики математических моделей и в поиске новых конструктивных решений для создания минироботов с целью выяснения способов улучшения их технических характеристик.

Хотя ранее были созданы некоторые модели миниатюрных роботов, предназначенные для движения по вертикальным поверхностям и в ограниченном пространстве, однако процессы взаимодействия с поверхностью, динамика роботов и соотношения между параметрами были изучены недостаточно. В частности, недостаточно изучено движение роботов с электромагнитными приводными системами.

Цель работы заключается в получении данных о взаимовлиянии параметров динамики роботов, в разработке математической модели движения миниатюрного робота, перемещающегося в ограниченном пространстве и в разработке метода расчета наноструктурированного адгезионного материала для применения в устройствах сцепления с поверхностью, выявлении с помощью этих моделей необходимых параметров для достижения нужных функциональных технических характеристик робота. Для достоверности теоретических выводов выполнены экспериментальные исследования.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи.

Построить математические модели динамики движения внутритрубного робота и устройства сцепления с поверхностью.

Выявить наилучший набор параметров для достижения нужных технических характеристик робота и устройств сцепления с поверхностью.

Провести сравнение с экспериментально полученными данными для обоснования построенных моделей.

Поставленные задачи решаются с помощью методов теоретической и прикладной механики, теории робототехнических систем и вычислительной техники. Результаты моделирования и теоретические выкладки сверяются с

экспериментальными данными, полученными в ходе проведения испытаний
и с данными, взятыми из мировых источников.

1. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ РОБОТОВ ДЛЯ ДВИЖЕНИЯ В ОГРАНИЧЕННОМ ПРОСТРАНСТВЕ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ.

Ползающие и шагающие роботы могут решить ряд проблем эксплуатации технического оборудования, контроля и безопасности во многих отраслях. Уже созданные рабочие машины и прототипы продемонстрировали свой промышленный потенциал в качестве техники, способной выполнять задачи в экстремальных средах или выступать в качестве рабочих платформ манипуляторов для работы в ранее недоступных зонах.

Все более жесткие требования предъявляются к роботам в таких областях деятельности как; например, обезвреживание взрывоопасных веществ, антитеррористическая деятельность, нефтяная шельфовая промышленность, инспекция высоких конструкций, зданий и судов. Здесь необходимы роботы, которые могли бы разумно работать в неструктурированных средах. Ядерная промышленность также занимается всё более сложными задачами эксплуатации и проверки реакторов. Для этого требуются машины, способные эксплуатироваться в условиях повышенной радиации, что требует максимального упрощения конструкции и по возможности исключения присутствия на борту сложной электроники, которая подвержена радиационному воздействию. Роботы, необходимы там, где не могут находиться люди из-за опасного характера работ и трудоемкости за пределами человеческих возможностей или из-за того, что не могут быть гарантированы надлежащее качество или надёжность. Такие машины позволяют реализовать жизненно важную технологию, позволяющую проводить дистанционную инспекцию, мониторинг и ремонтные работы в самых разнообразных отраслях.

Потенциальные области применения таких роботов.

Охрана объектов повышенной опасности, таких как атомные электростанции, взрывоопасные объекты и т.д.

Выполнение антитеррористических операций.

Поиск взрывоопасных веществ, их идентификация и обезвреживание (в том числе ликвидация) при помощи навесного оборудования.

Роботы вертикального перемещения изначально разрабатывались в первую очередь для ядерной промышленности, но сейчас они рассматриваются для более широкого использования; хотя потребность в роботах с дистанционным управлением в сфере ядерной энергетики по-прежнему остаётся актуальной в связи со спецификой радиоактивной среды.

В сфере строительства: устройства, способные производить инспекцию, а также обладающие различными функциями, такими как мытьё окон. Это решит текущие проблемы с воздвижением дорогостоящих и неэстетичных лесов для проведения реконструкции зданий и сооружений.

Шельфовая промышленность заинтересована, в частности, в ползающих роботах; есть необходимость, обусловленная требованиями безопасности, в создании ползающей машины, способной выполнять эксплуатационные работы на шельфовых нефтяных вышках, удаление окалины и наростов с подводной части установок и кораблей.

Способы применения роботов под водой также очевидны; требуются подводные роботы, которые могли бы проводить инспекцию мостов и впускных труб гидроэлектростанций. Прочие применения включают в себя инспекцию протечки нечистот, трубопроводов и полочки в системе канализации. Роботы, способные выполнять данные работы могут быть использованы для очистки судов во время их нахождения в плавании.

Добывающая промышленность выявила потребность в устройствах, которые могли бы выявлять протечки газа, возникающие после разведывательного взрыва, поскольку действующие мониторинговые технологии не вполне эффективны. Кроме того, службы техники безопасности обозначили потребность в устройстве, способном карабкаться и

переползать через неструктурированные поверхности неиспользуемой шахты, чтобы проводить мониторинг спонтанных взрывов в неиспользуемых проходах.

В химической промышленности; сбор образцов загрязнённой почвы, инспектирование и ремонт оборудования, которое гораздо дороже обеззараживать, ремонтировать и делать пригодным для рабочих. Или устройство, способное проводить ультразвуковые измерения внутри больших ёмкостей с небольшим отверстием.

Невозможно переоценить значение использования ползающих или шагающих роботов службами спасения в опасных зонах разрушенных пожаром или землетрясением для сбора образцов и поиска выживших.

Коммерчески обоснованными были признаны исследования в области создания робототехники, применяемой на трубопроводах. Миниатюрные ползающие роботы можно использовать в области отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха в целях проверки, эксплуатации и очистки системы труб и глушителей. Устройства, ползающие по трубам, необходимы в таких сферах, как проверка труб водоотвода, водоснабжение и строительство, а также нефтегазовой отрасли, где используется аналогичное оборудование. Такие устройства можно использовать и на магистральных водопроводах для выявления протечек.

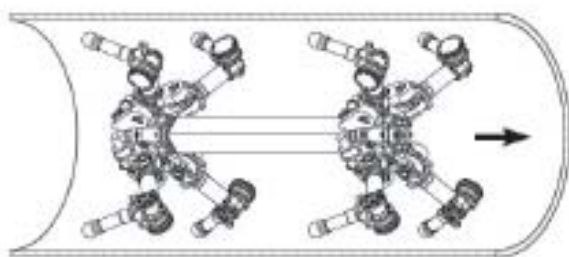
Нанесение на карту туннелей и труб в неиспользуемых установках и старых карьерах, которые небезопасны, где отсутствуют данные о проложенных трубах, также является перспективным направлением.

Для инспекции тонких трубопроводов, в частности в авиационной и космической технике, в атомной энергетике, могут оказаться полезными роботы, способные перемещаться в трубах малого диаметра (10 – 20 мм).

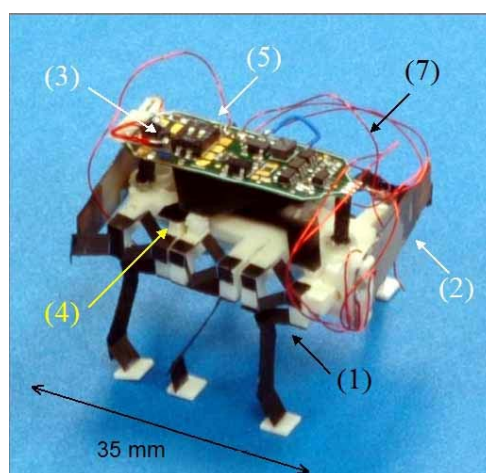
Конструкции роботов для перемещения в ограниченных пространствах могут быть различных типов.

Шагающие роботы обладают большой маневренностью, основным их недостатком является сложность конструкции. Шагающий робот, имеющий

размеры порядка метра, предназначенный для движения в трубах описан в работе [1] (рис. 1.1 а). За последнее время произошло существенное продвижение вперед в области миниатюризации шагающих роботов. Так в Калифорнийском университете (США) при помощи технологии изготовления углеродных волокон (carbon fiber fabrication technology) был создан автономный миниатюрный шагающий робот [2], имеющий линейные размеры порядка десятков миллиметров и приводящийся в движение пьезоактюаторами (рис. 1.1. б).



а

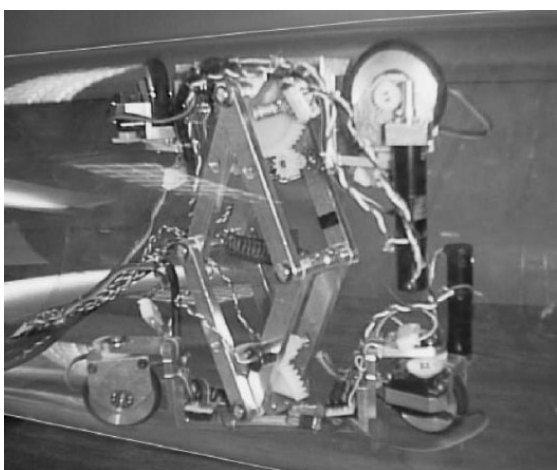


б

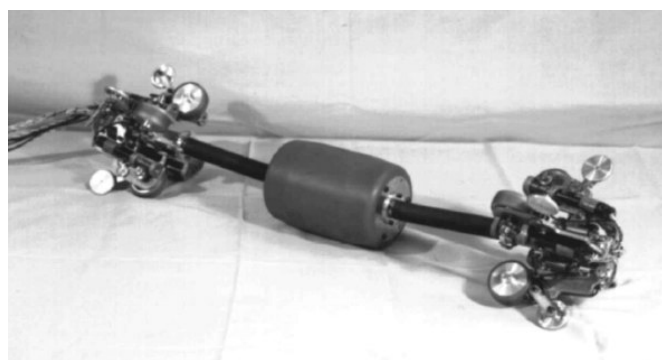
Рис. 1.1 а) внутритрубный шагающий робот, б) Миниатюрный шагающий робот. (1) каркас робота, (2) актюаторы, 3. бортовая электроника, 4. источник питания (встроен в каркас), 5. контроллер с заданной программой, 6. датчики (не показаны), 7. соединительные провода.

Колесные роботы, как правило, обладают хорошими динамическими характеристиками. К недостаткам таких конструкций можно отнести необходимость наличия трансмиссии, что усложняет конструкцию, а также наличие шарнирных соединений, которые сложны в изготовлении при

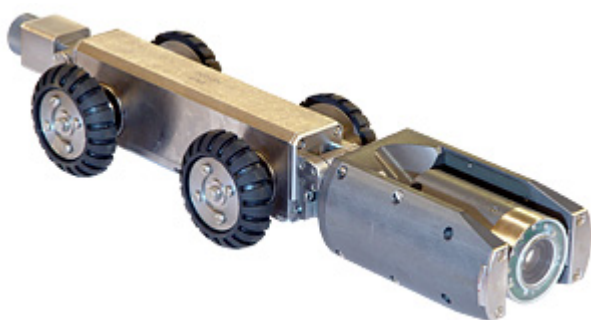
миниатюрных размерах. В работе [3] описан колесный внутритрубный робот созданный в Университете Ниагата (Япония), оснащенный рулевым механизмом и устройством, распирающим пары колес внутри трубы. Размер робота порядка десятков сантиметров, вес около килограмма (рис. 1.2 а). Примером использования в промышленности может служить внутритрубный робот, показанный на (рис. 1.2 б) созданный в компании «Токио газ» (Япония). Робот предназначен для инспекции газовых трубопроводов. Его длина порядка метра, вес 9 кг. Также ими был разработан автономный внутритрубный робот, управляющийся по радиоканалу [4].



а



б



в



г

Рис. 1.2 Колесные роботы для движения в ограниченных пространствах.

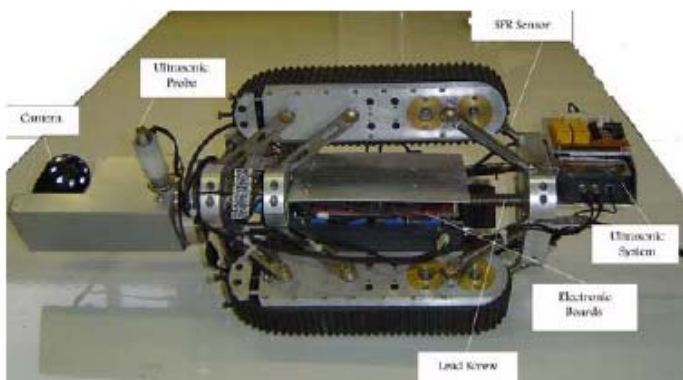
В России, предприятием НПО «Тарис» производится робот для телеинспекции внутренней поверхности труб, показанный на рис. 1.2 в. Робот заполняется изнутри сухим азотом для предотвращения конденсации влаги внутри корпуса при работе с перепадом температур. Робот построен на многофункциональной платформе управления: оборудование функционально состоит из законченных модулей (видеокамера, устройство наведения, транспортный модуль, пульт управления и т.д.). Каждый модуль имеет единый интерфейс управления и питания, а также систему внутренней диагностики неисправностей (датчики давления и температуры, устройства защиты по току и напряжению). Модули легко заменяемы и позволяют строить телеинспекционные системы с необходимыми характеристиками. Большинство законченных модулей могут применяться в других робототехнических комплексах производства ЗАО «Тарис». В Лаборатории робототехники и мехатроники Института проблем механики Российской академии наук создан робот с колесными движителями, способный перемещаться по плоскости, ориентированной под любым углом к горизонту (см. рис. 1.2 г). Прикрепление робота к поверхности осуществляется за счет так называемого скользящего уплотнения, суть которого заключается в следующем: к плоскости прижимается герметичная чаша, жестко соединенная с корпусом робота, из чаши компрессором откачивается воздух, из-за разности атмосферного давления и давления внутри чаши появляется сила, прижимающая чашу к поверхности и удерживающая робота на поверхности [5]. Одна из областей применения такого робота – инспекция и чистка поверхностей зданий и сооружений, например мойка стекол высотных зданий. Диаметр робота порядка десятков сантиметров. Многозвенный робот вертикального перемещения, состоящий из трех модулей со скользящим уплотнением описан в [6]. Он предназначен для инспекции качества стеновых покрытий и наличия трещин в стенах, например при строительстве. Многозвенная конструкция позволяет преодолевать более значительные

препятствия, например выступы стен, а также обеспечивает возможность перехода с поверхности на поверхность, ориентированные под углом друг к другу.

Роботы на гусеничном ходу также используются для движения внутри труб и по произвольно ориентированным в пространстве поверхностям. Для перемещения по вертикальным поверхностям траки гусениц робота могут быть снабжены вакуумными присосками, пример такого робота приведен на рис. 1.3 а, созданный в ООО НПП «Клаймер» (г. Снежинск, Челябинская обл.) [7]. Устройство может выполнять очистку, покраску, устранения дефектов на большой высоте, доставку средств спасения или обезвреживание опасных объектов. Отсутствие электроники позволяет ему функционировать в условиях повышенного электромагнитного или радиационного поля. В работе [8] описан гусеничный внутритрубный робот, созданный в Tarbiat Modares University (Иран) (рис. 1.3 б). Одно из преимуществ гусеничной конструкции заключается в увеличении площади соприкосновения с поверхностью, что позволяет использовать большее количество устройств



а



б

Рис. 1.3. Гусеничные роботы. а) на вакуумных присосках, б) внутритрубный.

сцепления с поверхностью (присосок, магнитов). В то же время робот в таком исполнении обладает лучшими, чем шагающий, скоростными характеристиками.

В последнее время появилось множество конструкций многозвенных роботов, которые перемещаются, осуществляя периодические изменения формы корпуса. Основные принципы движения гибких тел на шероховатой поверхности были рассмотрены в работах [9, 10]. В работах [11 – 13] было показано, что возможно движение многозвенного механизма, который соприкасается с поверхностью по всей своей длине на протяжении всего движения за счет чередования «быстрых» и «медленных» движений. Во время «быстрых» движений момент, создаваемый в шарнире соответствующего сочленения должен быть значительно больше моментов сил трения, тогда на месте будет оставаться центр масс системы. Во время «медленных» движений момент в соответствующем шарнире должен быть немногим более главного момента сил трения, тогда центр масс системы будет перемещаться. В [12] показано, что для осуществления такого движения достаточно двух звеньев, в сочленении которых находится двигатель, способный вращать одно звено относительно другого. В работе [13] рассмотрен способ движения многозвенного механизма, имеющего как минимум пять звеньев, с использованием только «медленных» движений. Такая конструкция робота может быть применена и для движения внутри труб. В этом случае звенья робота будут служить ему как корпусом так и упорами, с помощью которых он закрепляется внутри трубы. Для движения внутри трубы без использования дополнительных упоров роботу понадобятся, как минимум пять звеньев, если труба прямолинейна и шесть, если она имеет закругления [14]. Подобная конструкция многозвенного змееподобного робота предложена в [15]. На рис. 1.4 представлено изображение многозвенного робота, созданного в ЦНИИ робототехники и технической кибернетики (Санкт-Петербург) [16].

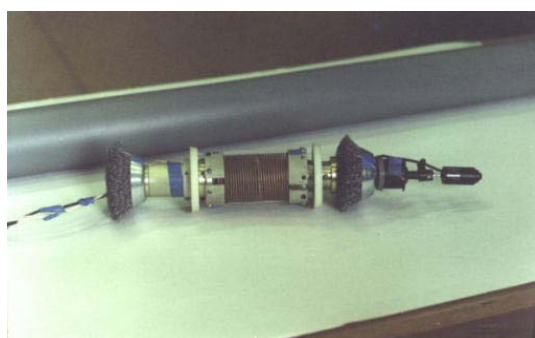


Рис. 1.4. Змееподобный многозвенный робот «Змеелок-1».

Одним из требований при миниатюризации конструкций является их упрощение. Подходящим решением этой задачи стало создание инерционных роботов. Контактные площадки такого робота находятся в постоянном соприкосновении с поверхностью, а движение осуществляется за счет движения внутренних масс [17].

Робот со скользящими упорами, которые находятся в непрерывном контакте с внутренней поверхностью трубы создан в Лаборатории робототехники и мехатроники Института проблем механики Российской академии наук (см. рис. 1.5 а). Движение осуществляется за счет анизотропности трения между упорами и стенкой трубы. Анизотропность появляется вследствие того что щетинки наклонены под некоторым углом к поверхности, поэтому им легче скользить в направлении их наклона. На Рис. 1.5 б представлены миниатюрные электромагнитные внутритрубные роботы с упорами, обладающими анизотропным трением, созданные также в Институте проблем механики РАН. Эти роботы предназначены для технической инспекции трубопроводов. В работе [18] описан робот с подобными упорами, способными принимать форму поверхности трубы (рис. 1.5 в,г). Область применения такого робота расширяется, он может использоваться как в трубах с переменным сечением, так и для проникновения в отверстия и щели неправильной формы, например при перемещении в развалинах зданий. На рис. 1.5 в показан один упор с

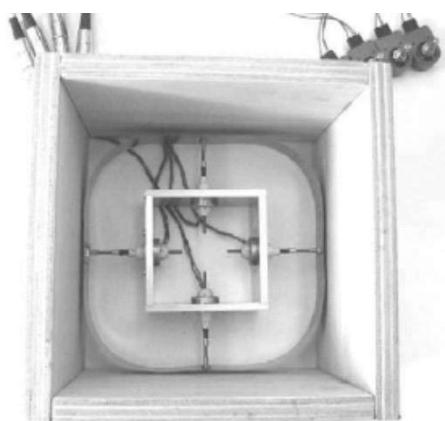
изменяемой геометрией, находящийся в трубе квадратного сечения. На рис. 1.5 г изображен датчик, определяющий форму сечения трубы.



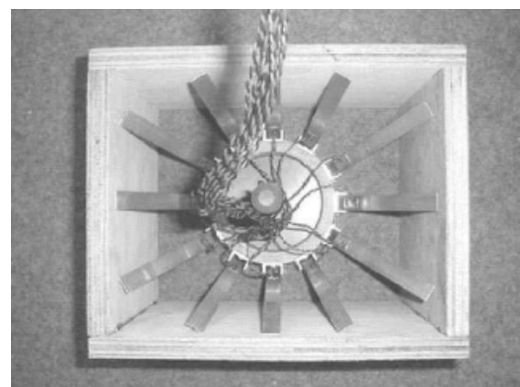
а



б



в



г

Рис. 1.5. Роботы со скользящими упорами. а) внутритрубный робот с упругой передачей, б) миниатюрные электромагнитные роботы, в) робот с изменяемой формой упоров в квадратной «трубе», г) датчик определения формы трубы.

В работах [19 – 21] рассмотрены несколько конструкций роботов, в которых для сцепления с поверхностью использован ворсиситый адгезионный материал (см. рис. 1.6). В гусеничной и колесной конструкциях роботов, представленных на рис. 1.6 предварительное прижатие схвата к поверхности осуществляет так называемый «хвост» - это упругая пластина, которая одним концом опирается на поверхность, а ее второй конец

прикреплен к роботу, возникающий при этом момент обеспечивает нужное прижимное усилие.

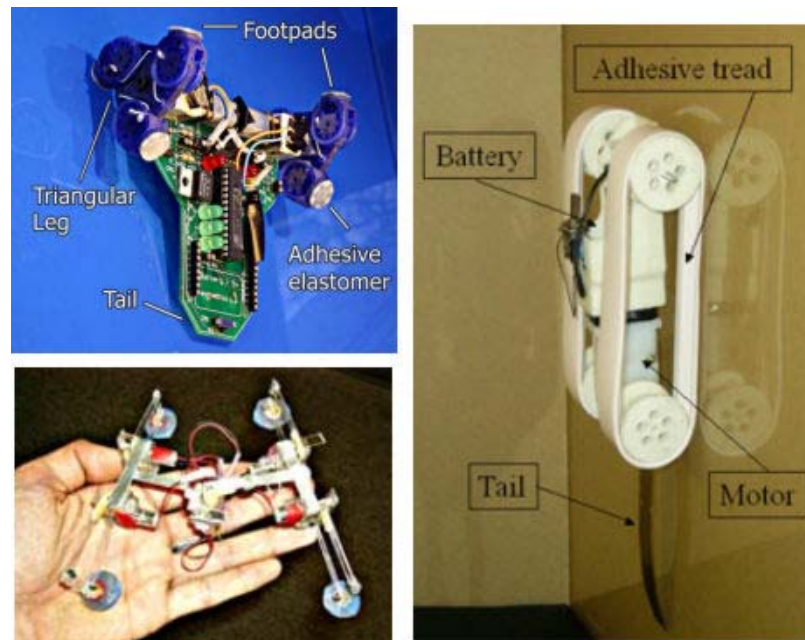


Рис. 1.6. Роботы, использующие гекко-подобный материал в схватах.

Постепенный отрыв схвата в случае гусеничного робота происходит за счет момента, создаваемого задним колесом, а в шагающих моделях механизмом, показанным на рис. 1.7.

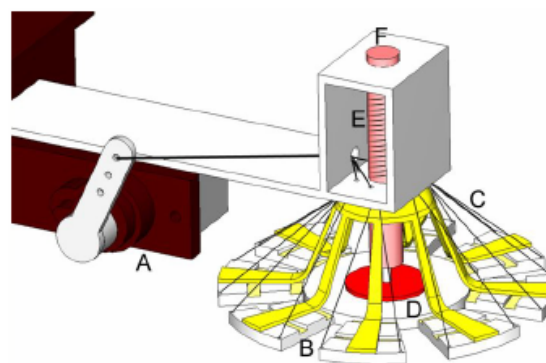


Рис. 1.7. Механизм для постепенного отрыва схвата от поверхности. А: сервомотор, В: гекко-подобный адгезионный материал, С: струны, D: вращательный шарнир, Е: пружина, F: шток.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ВНУТРИТРУБНОГО МИНИРОБОТА

2.1. Конструкция робота.

В лаборатории Робототехники и мехатроники Института проблем механики Российской академии наук создан миниатюрный внутритрубный робот с электромагнитным приводом [22,23]. Фотография робота представлена на рис. 2.1, а на рис. 2.2 дано его схематическое изображение. Основные составляющие его конструкции – корпус и шток, который совершает периодические движения относительно корпуса. Внутри корпуса расположен соленоид, способный втягивать шток при подаче напряжения на контакты соленоида. На шток надета пружина, которая стремится вытолкнуть его из корпуса. Шток и корпус снабжены упорами, посредством которых робот контактирует с поверхностью трубы. Упоры сконструированы так, что при движении робота вперед (в желаемом направлении), трение о поверхность трубы слабее, чем при движении в обратном направлении. Технические характеристики робота представлены в табл. 2.1.

Движение робота осуществляется повторением циклов, каждый из которых состоит из двух этапов: втягивание штока и его выталкивание. В первой фазе движения (см. рис. 2.3 а) на контакты соленоида подается напряжение. Соленоид стремится втянуть шток, но так как трение упора штока в обратном направлении больше, чем трение упора корпуса, то корпус подтягивается к штоку. При этом пружина сжимается. Во второй фазе (см. рис. 2.3 б) с соленоида снимается напряжение и происходит выталкивание штока за счет высвобождения упругой энергии пружины. При этом штоку легче двигаться вперед, чем корпусу назад из-за разности в коэффициентах трения упоров штока и корпуса. После второй фазы движения робот

приходит в исходное положение (см. рис. 2.3 в), сдвинутое на величину X по ходу движения. Величина X является рабочим ходом штока.

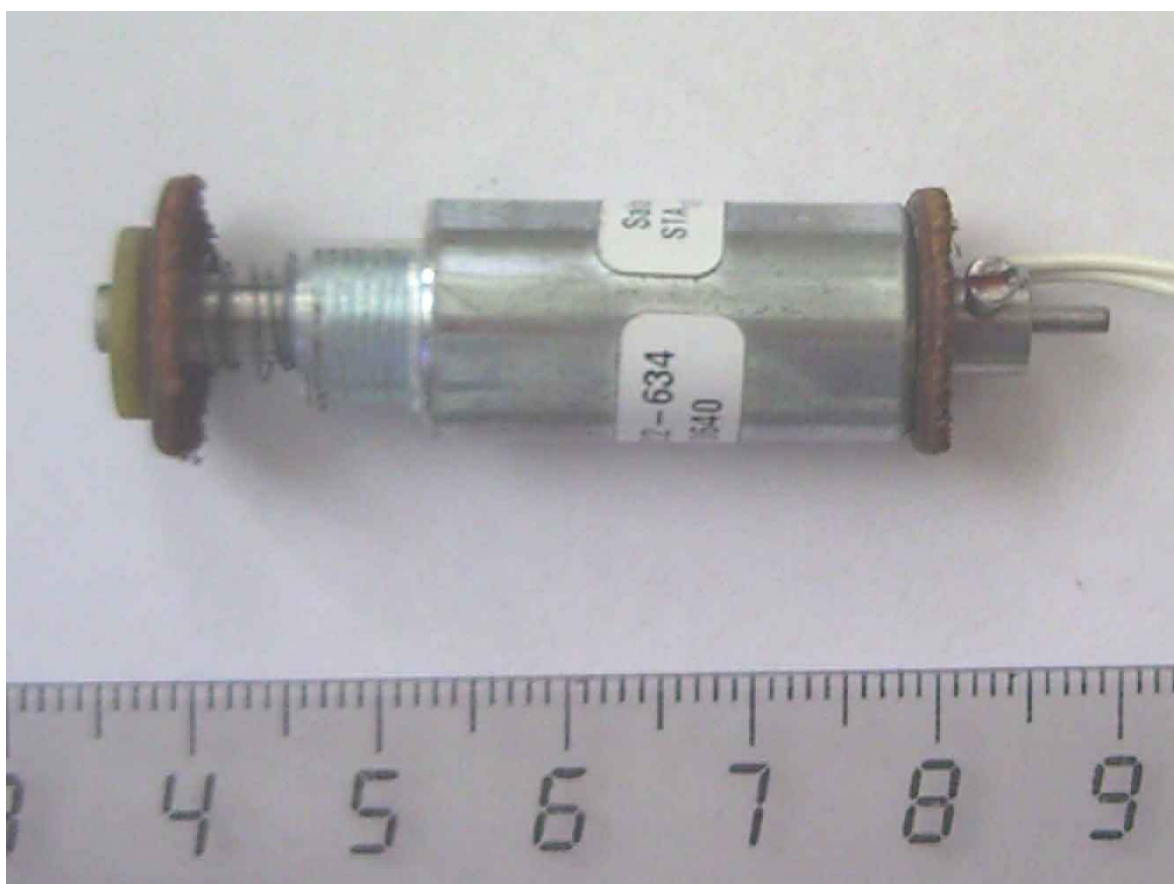


Рис. 2.1. Внутритрубный мини-робот.

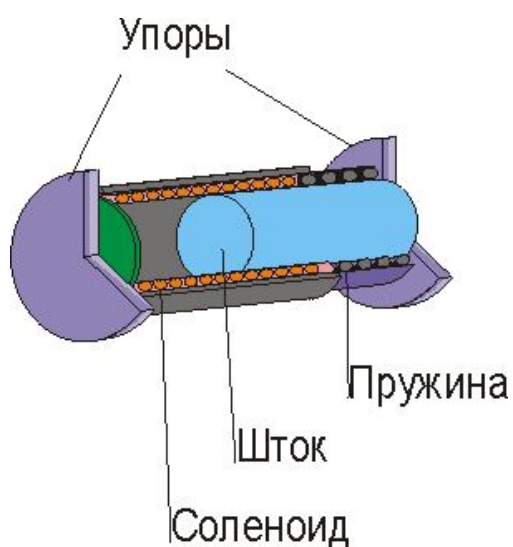


Рис. 2.2. Внутреннее устройство робота.

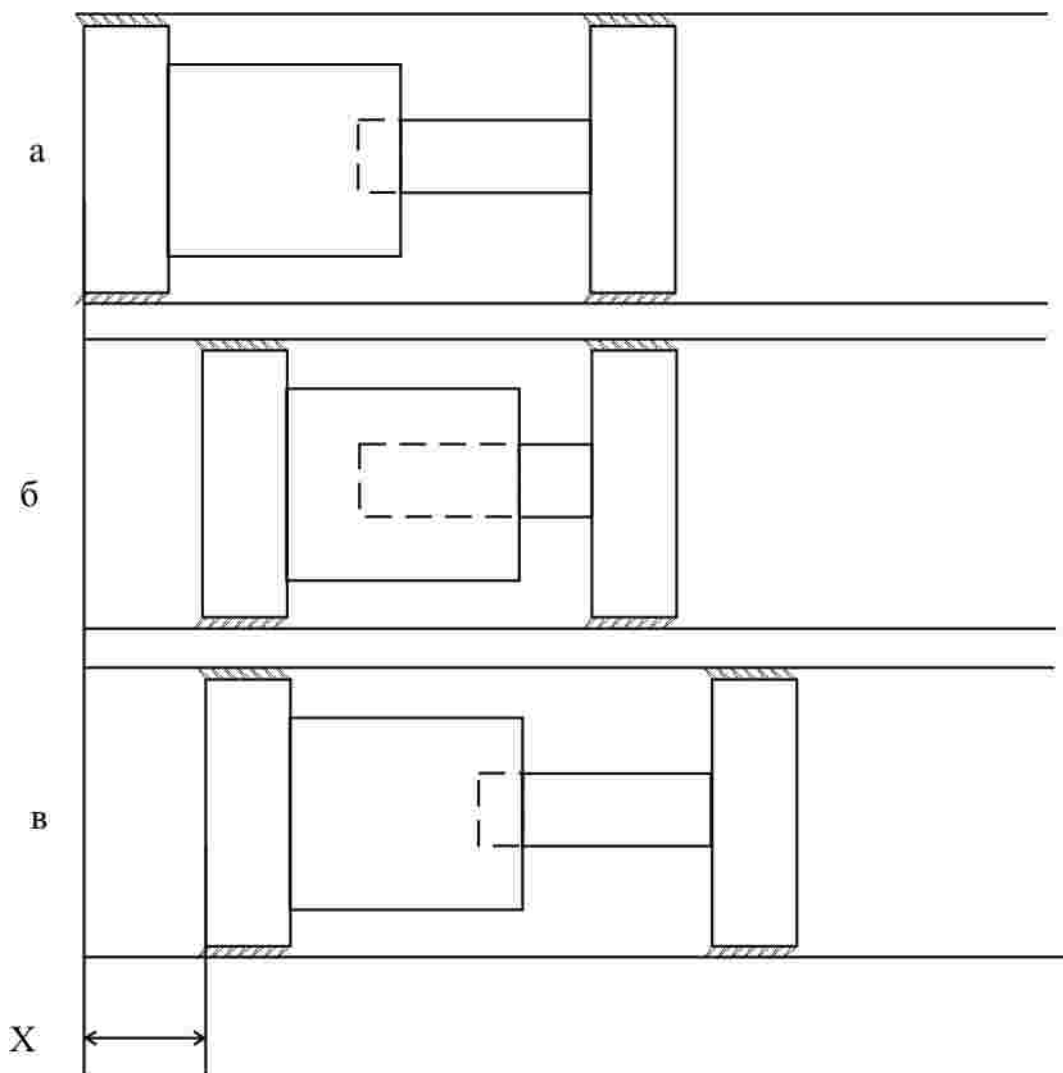


Рис. 2.3. Фазы движения робота.

Выбранная конструкция робота обладает рядом преимуществ. Роботы, способные перемещаться в трубах малого диаметра, описаны в работах [24 – 26]. В основном это роботы, подвижные части которых перемещаются прямолинейно. Для осуществления такого движения могут быть использованы следующие виды двигателей: электромагнитные [26], пьезоэлектрические [25], пневматические [24], а также, возможно, гидравлические, электростатические, основанные на использовании материалов с эффектом памяти формы. Электростатические и пьезоэлектрические в настоящее время могут осуществлять перемещение на

расстояние порядка десятков микрометров и применяются там, где необходима большая точность позиционирования, но не нужна большая скорость движения.

Табл. 2.1. Технические характеристики внутритрубного робота.

Величина	Значение
Масса штока	5.8 г
Масса корпуса	17.6 г
Жесткость пружины	360 Н/м
Сила трения при движении вперед	0.536 Н
Сила трения при движении назад	4.234 Н
Длина	50 мм
Диаметр корпуса	13.2 мм
Внутренний диаметр трубы	14 мм
Ход штока	3 мм
Сила втягивания электромагнита	0.8 Н

Пневматические – требуют наличия компрессора, что исключает возможность их автономного исполнения. Материалы с эффектом памяти формы обладают довольно большим временем отклика, что зачастую исключает возможность их применения. Электромагнитные в свою очередь могут быть двух типов. В первом приводе является электромотор, а возвратно-поступательные движения обеспечиваются сочленением винт-гайка. Во втором приводе является электромагнит, который втягивает ферромагнитный сердечник. Электромотор в таком случае уступает электромагниту по скоростным характеристикам. Таким образом,

электромагнит в качестве привода является одним из наилучших решений для создания робота возвратно-поступательного типа, способного передвигаться в трубах малого диаметра. Для закрепления робота внутри трубы ему необходимы упоры, которые могут быть двух типов. Первый тип – это управляемые упоры, упирающиеся во внутреннюю поверхность трубы по команде системы управления. Они требуют своего привода, что резко усложняет общую конструкцию. Второе решение – это неуправляемые упоры, обладающие анизотропией по трению и имеющие, таким образом предпочтительное направление движения (с наименьшим трением). При таком решении робот будет неспособен к реверсивному движению. Допустимо преодоление этого недостатка обеспечением возможности переключения упоров для изменения направления движения, что также усложнит конструкцию робота в целом.

2.2. Динамика движения робота.

Рассмотрим движение робота в прямолинейной трубе, которая может быть произвольно наклонена по отношению к горизонту. Угол наклона трубы обозначим посредством β . Введем обозначения: x_i ($i = 1, 2$) – координаты штока и корпуса соответственно, отсчитываемые вдоль оси трубы (абсолютные смещения штока и корпуса); m_i ($i = 1, 2$) – массы штока и корпуса соответственно; k – коэффициент жесткости пружины; g – ускорение силы тяжести. Здесь и далее индекс $i = 1$ соответствует штоку, $i = 2$ – корпусу. Точки отсчета координат x_1 и x_2 выбраны так, что при $x_1 = x_2$ пружина не деформирована, а в начальный момент времени $x_i = 0$. Силы, действующие на робот, показаны на рис. 2.4.

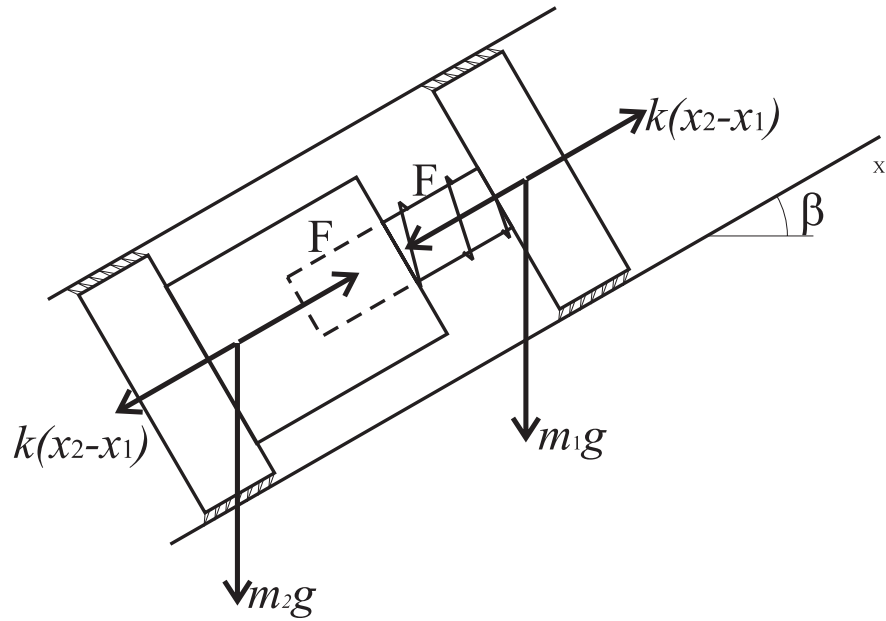


Рис. 2.4. Силы, действующие на робот (не показаны силы трения и реакции стенок трубы).

Шток втягивается в соленоид под действием электромагнитной силы $-F$. Кроме того, на шток и соленоид действуют силы упругости пружины, равные $k|x_2 - x_1|$ по абсолютной величине и противоположно направленные, сила тяжести $m_i g$ и сила реакции опоры N_i . Кроме того, на шток и корпус действуют силы сухого трения F_{mp}^i и силы сопротивления среды $D_i \dot{x}_i$ (D_i - коэффициент сопротивления среды).

Уравнения движения робота имеют вид:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 = -F + k(x_2 - x_1) - m_1 g \sin \beta - F_{mp}^1 - D_1 \dot{x}_1, \\ m_2 \ddot{x}_2 = F - k(x_2 - x_1) - m_2 g \sin \beta - F_{mp}^2 - D_2 \dot{x}_2. \end{cases} \quad (2.1)$$

Силы сухого трения F_{mp}^i положим кулоновыми, т.е.

$$F_{mp}^i = \begin{cases} \mu^+ N_i, (\dot{x}_i > 0 \text{ или } \dot{x}_i = 0 \text{ и } R_i \geq \mu^+ N_i), \\ -\mu^- N_i, (\dot{x}_i < 0 \text{ или } \dot{x}_i = 0 \text{ и } R_i \leq -\mu^- N_i), \quad (i=1,2), \\ R_i, (\dot{x}_i = 0 \text{ и } -\mu^- N_i \leq R_i \leq \mu^+ N_i), \end{cases}$$

$$R_i = (-1)^i [F - k(x_2 - x_1)] - m_i g \sin \beta - D_i \dot{x}_i.$$

Рассмотрим более подробно, чем обусловлена сила реакции стенки трубы N_i , входящая в выражение для силы трения. Пусть $P_i(\varphi)$ - распределение модуля силы нормальной реакции стенки трубы по ее внутренней окружности, φ - угол с произвольно выбранным направлением.

Тогда $N_i = \int_0^{2\pi} P_i(\varphi) r d\varphi$ (r - внутренний радиус трубы). Условие равновесия

сил, действующих на упор в плоскости, перпендикулярной оси трубы, будет выглядеть следующим образом:

$$\int_0^{2\pi} P_i(\varphi) \sin \varphi r d\varphi + m_i g \cos \beta = 0,$$

$$\int_0^{2\pi} P_i(\varphi) \cos \varphi r d\varphi = 0,$$

получим $N_i = m_i g \cos \beta + \int_0^{2\pi} P_i(\varphi) (\sin \varphi + 1) r d\varphi$. Первое слагаемое в

правой части последнего равенства обусловлено влиянием веса робота, а второе – упругостью упора, а также, возможно, силами адгезионного взаимодействия материала упора и поверхности трубы.

При втягивании штока на него действует электромагнитная сила $-F$. Расстояние, на которое шток втянут в соленоид, равно $x = x_2 - x_1$. Энергия

магнитного поля соленоида $W = \frac{1}{2} Li^2$, где i - ток в обмотке соленоида.

Индуктивность L зависит от положения штока относительно корпуса, т.е. от того, насколько глубоко шток втянут в соленоид. При втягивании штока на величину dx энергия магнитного поля соленоида изменится на dW .

Изменение энергии равно механической работе по перемещению штока $F dx$.

Сила втягивания штока в соленоид $F = \frac{dW}{dx} = \frac{1}{2} \frac{dL}{dx} i^2$ [27]. Система

управления обеспечивает питание катушки соленоида прямоугольными импульсами тока и снабжена схемой стабилизации питания по току. Для

простоты положим, что $\frac{dL}{dx} = const$. Тогда во время подачи тока на контакты соленоида сила, втягивающая шток, постоянна. Зависимость электромагнитной силы от времени показана на рис. 2.5.

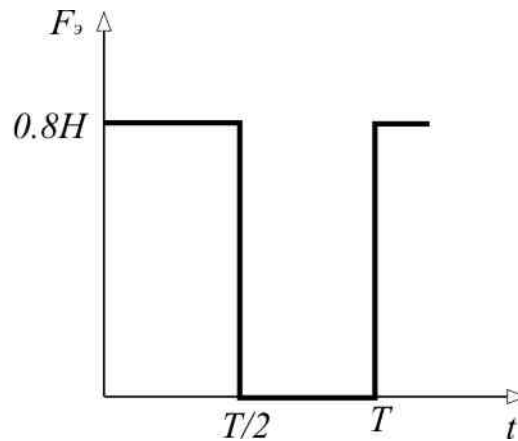


Рис. 2.5

Рис. 2.6. Зависимость электромагнитной силы от времени.

Координата центра масс робота $x_c = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2}{m_1 + m_2}$. Уравнение движения

центра масс можно получить, сложив уравнения системы (2.1),

$$(m_1 + m_2)\ddot{x}_c = -(m_1 + m_2)g \sin \beta - (F_{mp}^1 + F_{mp}^2) - D_1 \dot{x}_1 - D_2 \dot{x}_2.$$

Силой, направленной вдоль положительного направления оси x будет член, включающий силы сухого трения. На них накладывается ограничение

$$-\mu^+(N_1 + N_2) \leq -(F_{mp}^1 + F_{mp}^2) \leq \mu^-(N_1 + N_2).$$

Таким образом, чем больше отношение $\frac{\mu^-}{\mu^+}$, т.е. чем более анизотропно

трение, тем большим тяговым усилием может обладать робот по отношению к силе торможения, вызванной тем же сухим трением. Увеличить анизотропность трения и силу давления на стенки трубы можно за счет подбора материала упоров.

2.3. Моделирование динамики движения робота.

Было проведено численное моделирование уравнений (2.1) с помощью вычислительной среды Matlab. На рис. 2.7, 2.8 представлен результат моделирования для значений параметров, соответствующих характеристикам робота, указанным в табл. 2.1 и $D_1 = D_2 = 4.5 \cdot 10^{-6} \text{ Нс}^2/\text{м}$, $\beta = \pi/2$, $g = 9.81 \text{ м/с}^2$, $T = 0.16 \text{ с}$ (период действия электромагнитной силы).

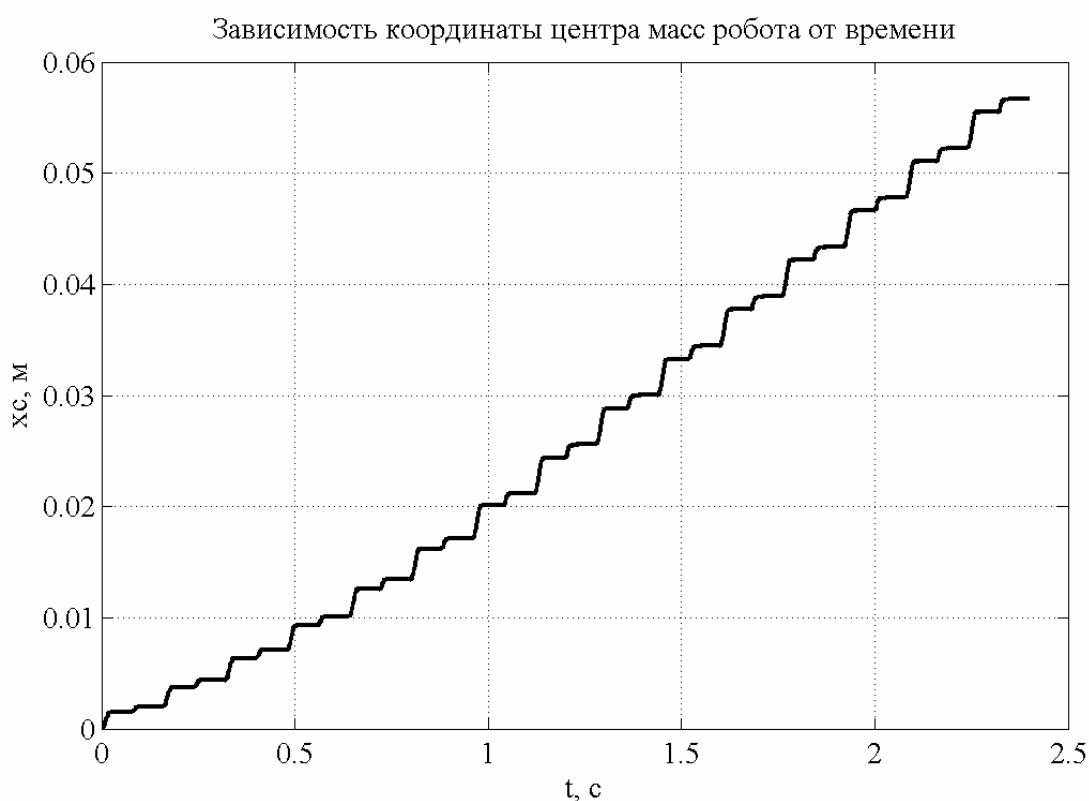


Рис. 2.7. Зависимость координаты центра масс робота от времени.

На рис. 2.9 изображена зависимость средней за период скорости движения робота (его центра масс) от частоты действия электромагнитной силы. Точками с указанием погрешностей показаны значения, полученные экспериментально.

Зависимость скоростей штока и корпуса от времени

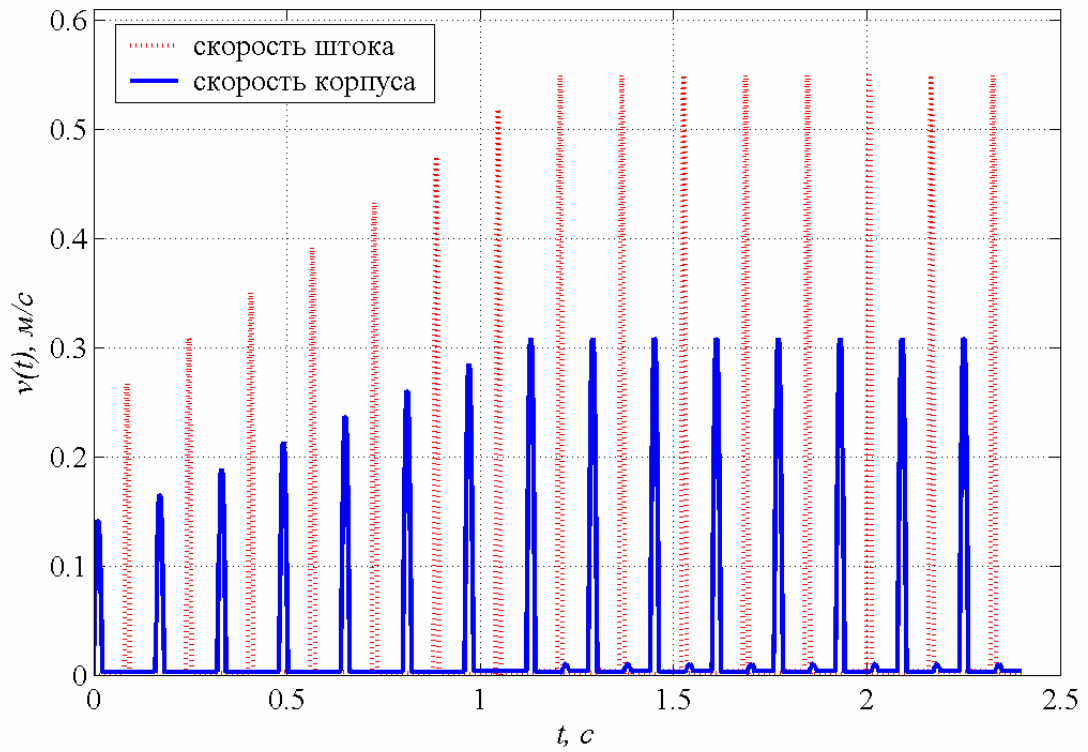


Рис. 2.8. Зависимость скоростей штока и корпуса от времени.

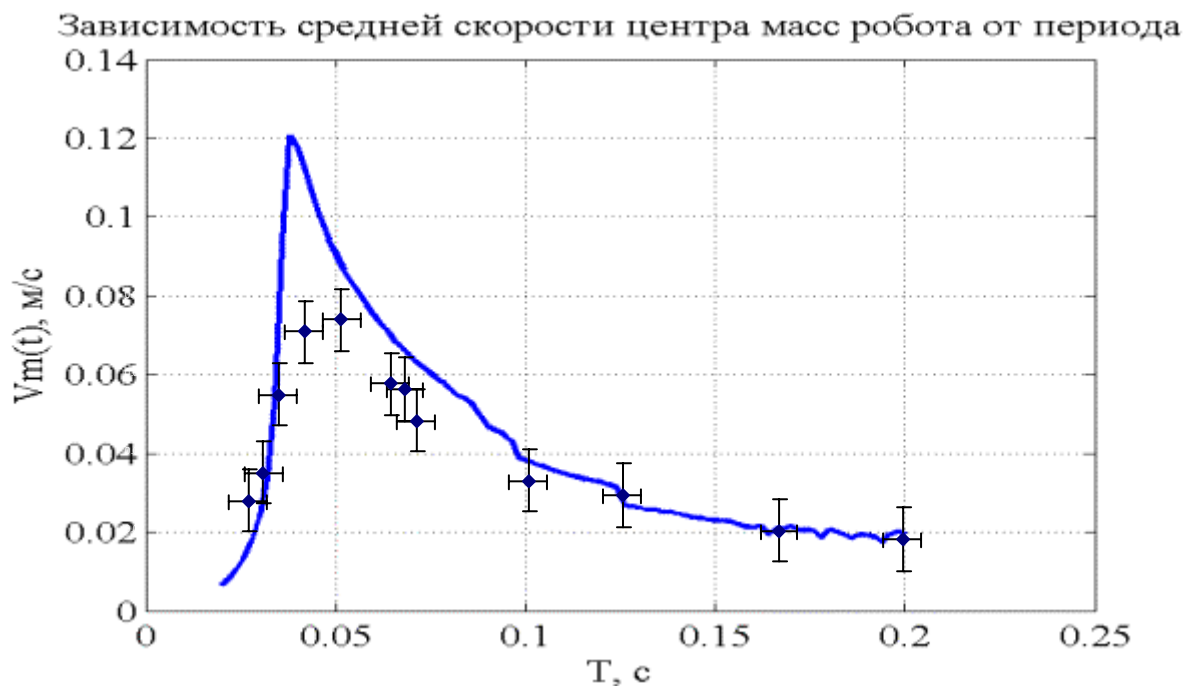


Рис. 2.9. Зависимость средней скорости центра масс робота от периода.

Период, соответствующий собственной частоте колебаний системы шток-пружина-корпус $T_0 = 2\pi \left(\sqrt{\frac{km_u + km_\kappa}{m_\kappa m_u}} \right)^{-1} \approx 0.02c$. Из рис. 2.9 видно,

что резонансный пик соответствует периоду, находящемуся около значения 0.04, что близко к собственной частоте колебаний корпуса на пружине при неподвижном штоке, которой соответствует период

$$T_{01} = 2\pi \left(\sqrt{\frac{k}{m_\kappa}} \right)^{-1} \approx 0.044c.$$

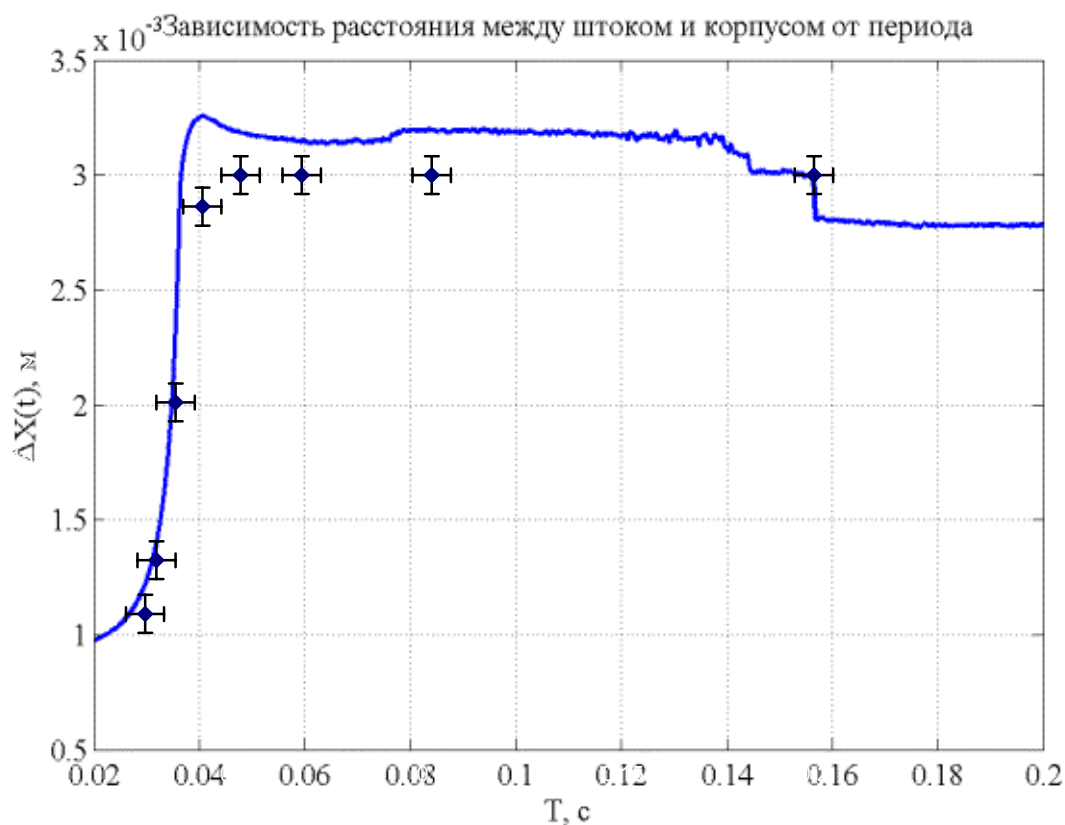


Рис. 2.10. Зависимость расстояния между штоком и корпусом от периода.

Вблизи резонанса увеличивается амплитуда колебаний корпуса и штока, вследствие чего достигается полный ход штока. Поэтому реальная скорость в области резонанса меньше расчетной.

На рис. 2.10 показана теоретическая зависимость максимального хода штока от периода действия электромагнитной силы, точками показаны экспериментальные значения с указанием погрешности измерений.

Рассмотрим движение корпуса и штока в течение одного ($T = 0.16c$) периода установившегося движения (см. 2.11). Наблюдаются участки, когда и шток и корпус находятся в покое. Обозначим отношение времени действия за период электромагнитной силы к величине периода посредством q . Тогда скважность импульса равна $1-q$. Меняя q , можно избежать простаивания. Это увеличит скорость движения робота. Зависимость максимальной скорости движения от q представлена на рис. 2.12. Изменение скоростей штока и корпуса за период при максимальной скорости движения, которая соответствует $q = 0.575$ и $T = 0,035c$, показано на рис. 2.13. На рис 2.14 представлена зависимость скорости движения робота (средней за период) от частоты действия электромагнитной силы и от протяженности ее импульса. Как видно из рисунка, максимальное значение скорости достигается при определенном периоде воздействий и определенной скважности импульса. С помощью рассмотренной модели можно определить значения q и T , при которых достигается максимальная скорость движения робота с требуемой точностью.

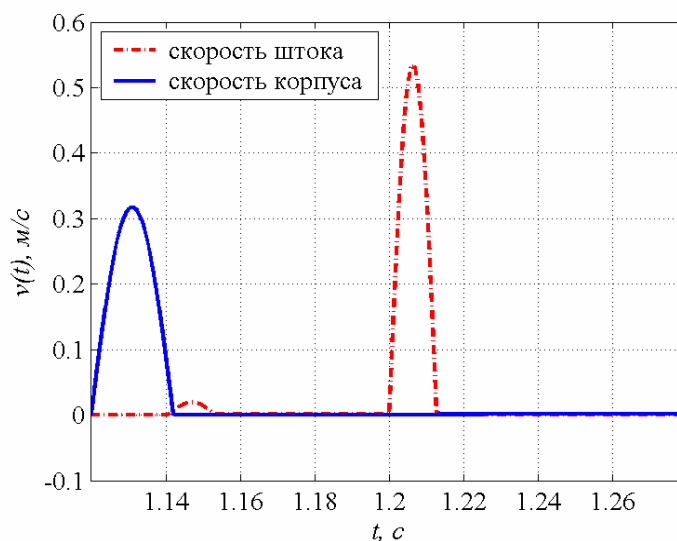


Рис. 2.11. Изменение скоростей штока и корпуса за период.

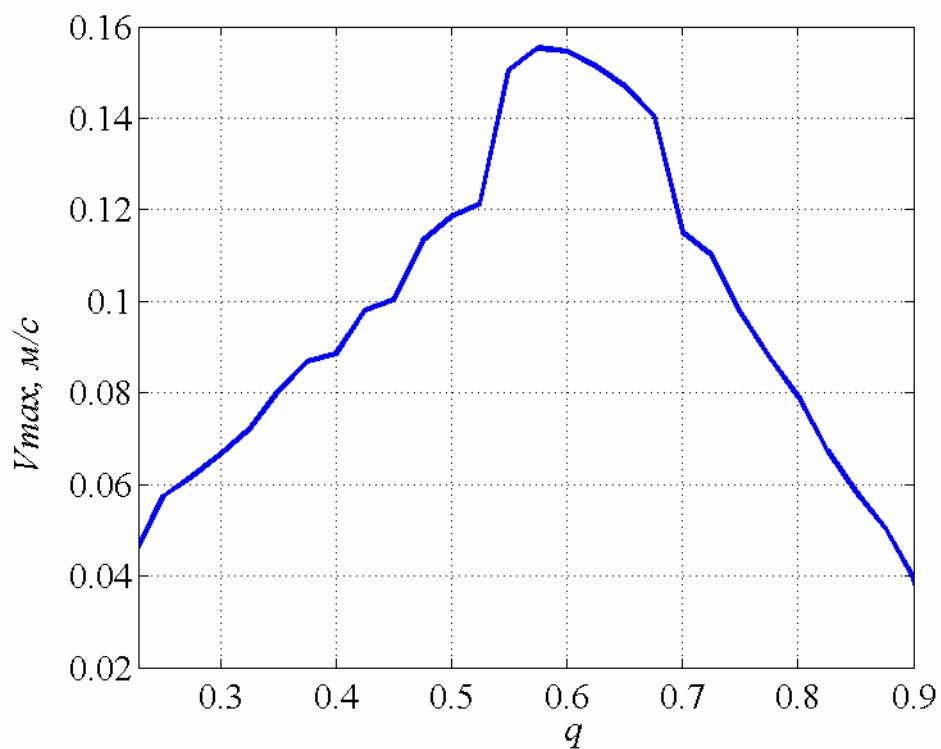


Рис. 2.12. Зависимость максимальной скорости движения от скважности импульса электромагнитной силы.

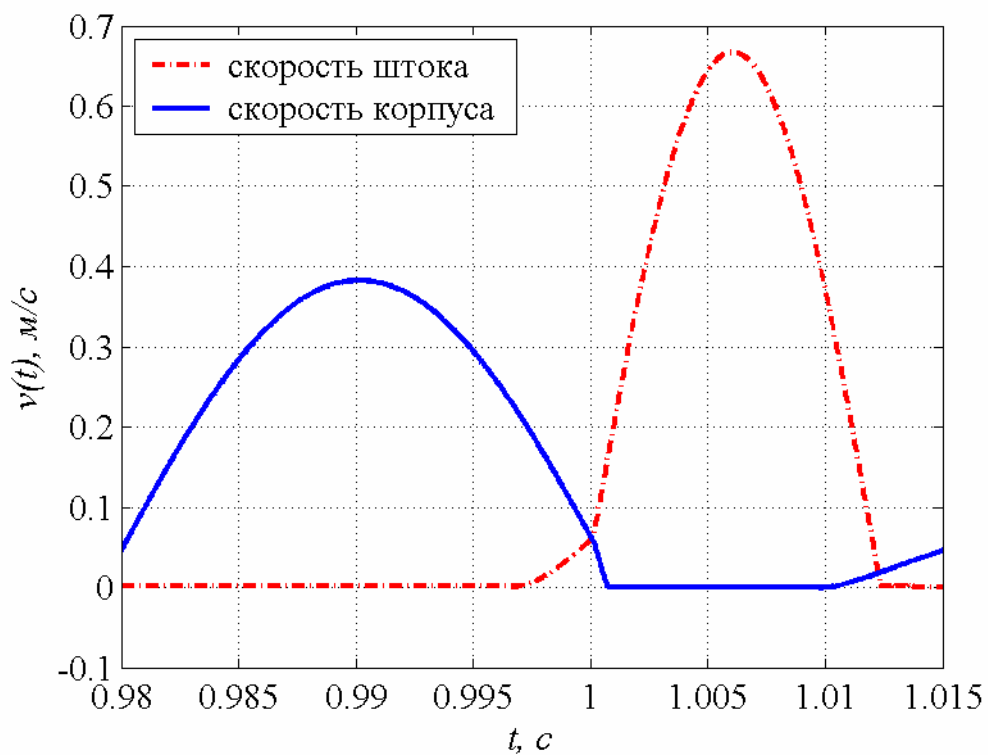


Рис. 2.13. Изменение скоростей штока и корпуса за период.

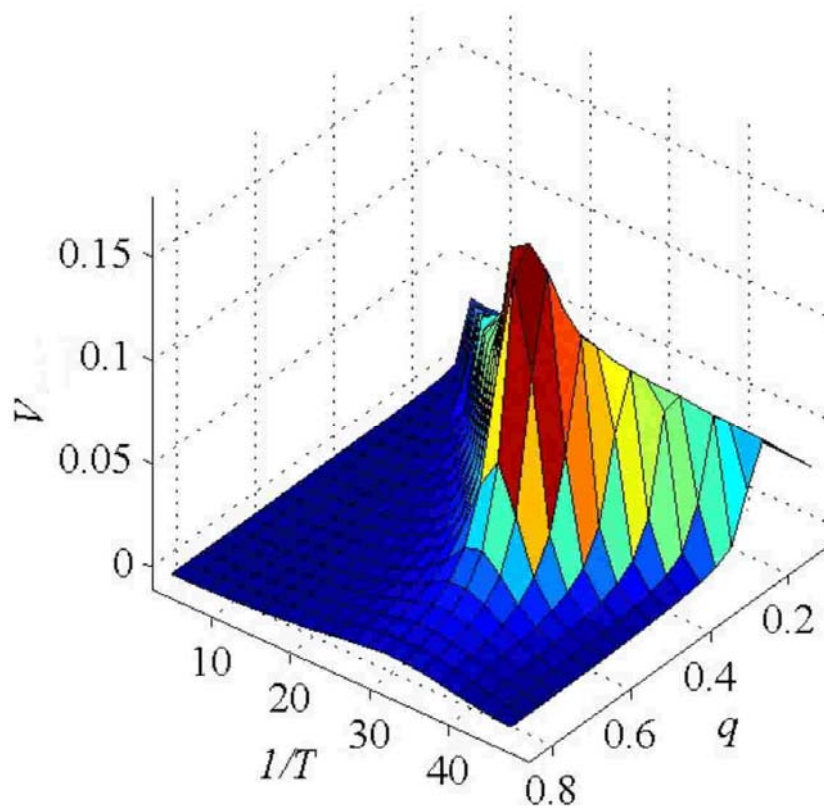


Рис. 2.14. Зависимость скорости робота от частоты внешних воздействий и протяженности импульса.

2.4. Внутритрубный миниатюрный робот с возможностью реверсивного движения.

Основным недостатком вышеописанной конструкции внутритрубного миниробота является невозможность его реверсивного движения. Для устранения этого недостатка нужно модернизировать упоры робота, чтобы иметь возможность «переключать» силу трения с большой величины на малую в нужном направлении. В лаборатории робототехники и мехатроники Института проблем механики Российской академии наук создан внутритрубный миниробот с возможностью реверсивного движения. Эта конструкция является модификацией внутритрубного робота, описанного выше. Фотография робота приведена на рис. 2.15.



Рис. 2.15. Миниатюрный внутритрубный робот с управляемым упором.

Робот состоит из двух модулей. Первый модуль предназначен для удержания робота внутри трубы и обладает анизотропией по трению в выбранном направлении. Второй – содержит маршевый двигатель, а его трение с поверхностью трубы изотропно. Для уменьшения общего веса конструкции было принято решение только один из упоров робота сделать управляемым. Таким упором является первый модуль, упор второго модуля не обладает анизотропией по трению. Маршевый двигатель, расположенный во втором модуле (см. рис. 2.16) представляет собой соленоид, при подаче напряжения на контакты которого, в него втягивается шток, как и в первой модификации робота. При снятии напряжения с контактов соленоида шток выталкивается пружиной, надетая на его ось. Для центровки модуля внутри трубы к внешней стороне его корпуса приклеены упругие полоски так, как показано на рис. 2.16. К штоку, посредством гибкой связи, прикреплен первый модуль. В первом модуле расположен электродвигатель, жестко соединенный с корпусом. На вал двигателя надет адаптер и закреплен болтом. В адаптере имеется резьбовое сквозное отверстие, в которое может ввинчиваться стержень. На свободном конце стержня с помощью винта

закреплены упоры. Упоры представляют собой лепестки из упругого материала, которые продеты сквозь специальные отверстия в корпусе. При вращении вала электродвигателя стержень перемещается поступательно, выдвигая нужные лепестки упоров. Местоположение отверстий выбрано таким образом, чтобы при максимальном выдвигении лепестка он был направлен под определенным углом к корпусу робота. Таким образом, меняя полярность питания электродвигателя, а значит и направление вращения его вала, можно изменять силу трения скольжения, действующую на первый модуль.

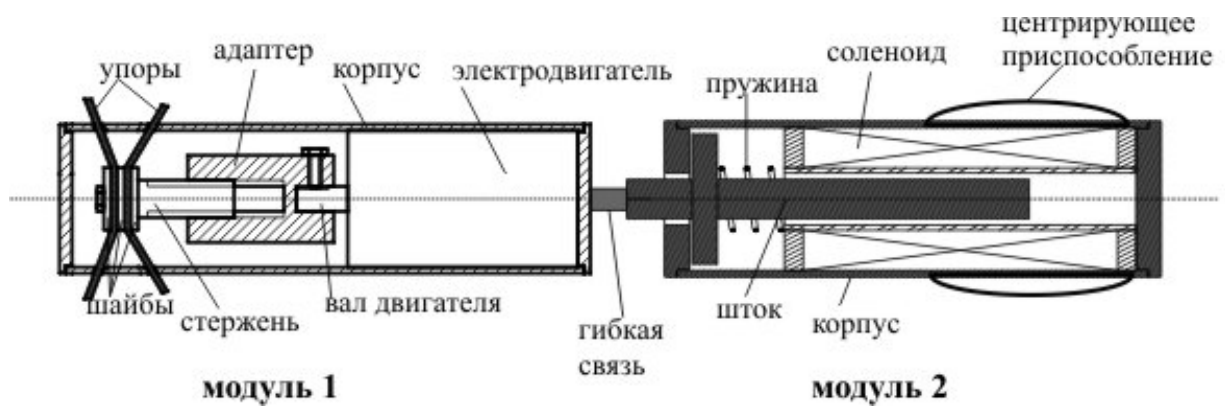


Рис. 2.16. Внутреннее устройство внутритрубного реверсивного минибота.

Обозначим коэффициент трения между вторым модулем и поверхностью трубы посредством μ .

Для описания динамики робота применялись уравнения (2.1). Выражение для силы трения примет вид:

$$F_{тр}^1 = \begin{cases} \mu^+ N_1, (\dot{x}_1 > 0 \text{ или } \dot{x}_1 = 0 \text{ и } R_1 \geq \mu^+ N_1), \\ -\mu^- N_1, (\dot{x}_1 < 0 \text{ или } \dot{x}_1 = 0 \text{ и } R_1 \leq -\mu^- N_1), \\ R_1, (\dot{x}_1 = 0 \text{ и } -\mu^- N_1 \leq R_1 \leq \mu^+ N_1), \end{cases}$$

$$R_1 = -F + k(x_2 - x_1) - m_1 g \sin \beta - D_1 \dot{x}_1,$$

$$F_{mp}^2 = \begin{cases} \mu N_2, (\dot{x}_2 > 0 \text{ или } \dot{x}_2 = 0 \text{ и } R_2 \geq \mu N_2), \\ -\mu N_2, (\dot{x}_2 < 0 \text{ или } \dot{x}_2 = 0 \text{ и } R_2 \leq -\mu N_2), \\ R_2, (\dot{x}_2 = 0 \text{ и } -\mu N_2 \leq R_2 \leq \mu N_2), \end{cases}$$

$$R_2 = F - k(x_2 - x_1) - m_2 g \sin \beta - D_2 \dot{x}_2.$$

Уравнения движения робота (2.1) с измененными представлениями для сил трения были проинтегрированы с помощью вычислительной среды MATLAB для значений параметров, соответствующих параметрам робота (см. табл. 2.2)

Табл. 2.2 Технические характеристики робота с возможностью реверсивного движения

Величина	Значение
Масса первого модуля	21.3 г
Масса второго модуля	23.1 г
Жесткость пружины	360 Н/м
Сила трения при движении вперед первого модуля	0.42 Н
Сила трения при движении назад первого модуля	3.35 Н
Сила трения скольжения второго модуля	0.7 Н
Длина робота	155 мм
Диаметр корпуса	13.2 мм
Внутренний диаметр трубы	14 мм
Ход штока	2 мм
Сила втягивания электромагнита	0.8 Н

На рис. 2.17 показана зависимость скоростей штока и корпуса от времени для $D = 4.5 \cdot 10^{-6} \text{ Нс}^2/\text{м}$, $\beta = 0$, $g = 9.81 \text{ м/с}^2$, $T = 0.04 \text{ с}$. На Рис. 2.18 показана зависимость скорости робота от частоты подаваемых импульсов и длительности действия импульса.

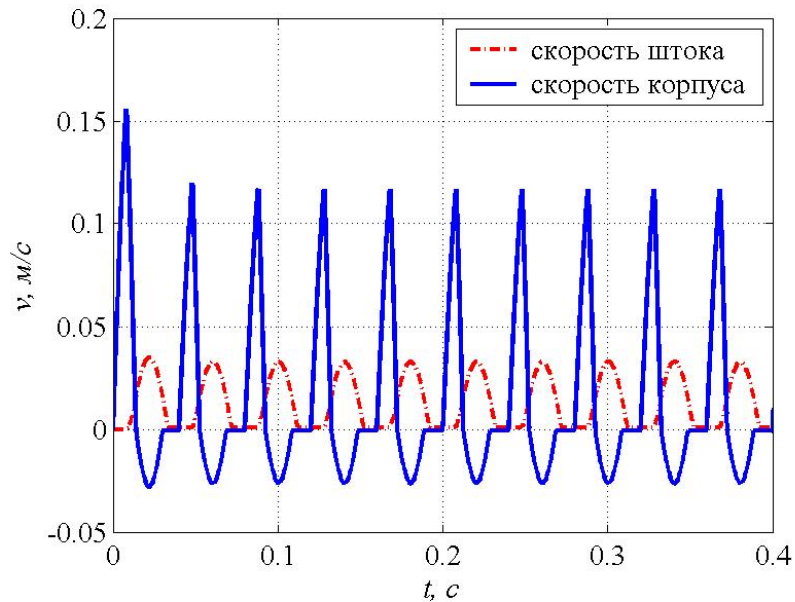


Рис. 2.17. Зависимость скоростей штока и корпуса внутритрубного робота с управляемыми упорами от времени.

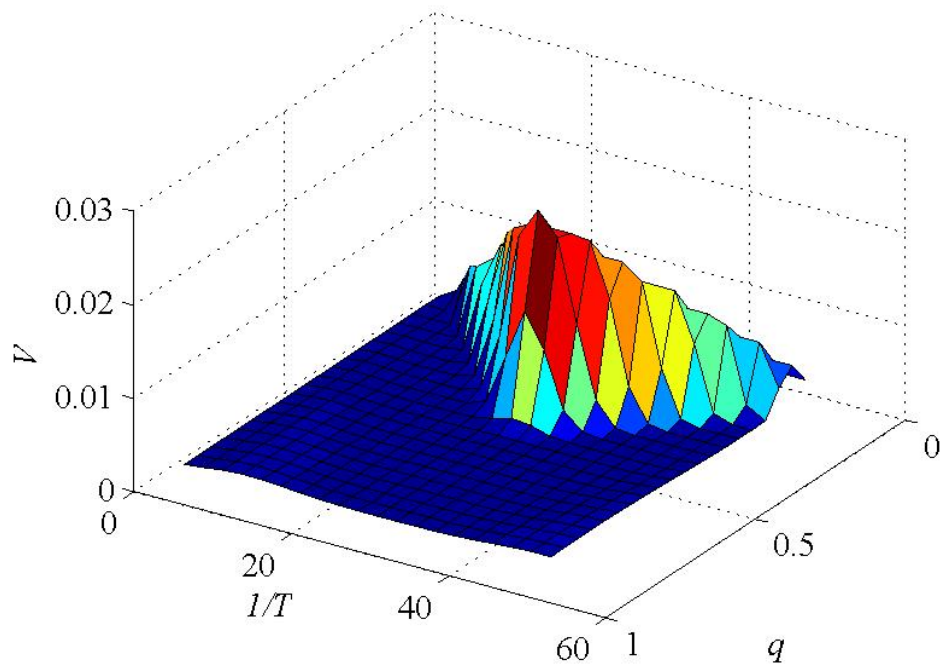


Рис. 2.18. Зависимость скорости робота от частоты и длительности импульса.

2.5. Моделирование упругого упора с анизотропным трением.

Выясним механизм анизотропии трения для упоров робота. Предположим, что упоры состоят из упругих волосков, основания которых расположены на корпусе робота, а их вершины упираются во внутреннюю стенку трубы (см. рис. 2.19). В случае однозвенного робота, неспособного к реверсивному движению можно считать, что из таких упругих волосков состоят упоры робота. В случае робота способного к реверсивному движению такими волосками будут служить выдвигающиеся лепестки упоров. Будем рассматривать случай движения робота в вертикальной трубе, когда его масса не оказывает влияния на силу реакции стенок трубы. Сумма модулей сил реакций стенки трубы N_i в этом случае будет равна NP , где N - количество волосков, P - сила, сжимающая один волосок.

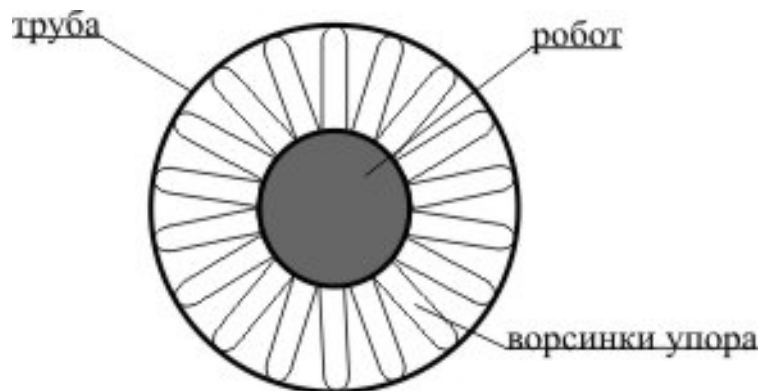


Рис. 2.19 Модель упоров внутритрубного робота.

Когда робот покоится, то волоски сжаты на величину $\Delta = L \sin \theta - H$ (см. рис. 2.20). Здесь L - длина волоска, θ - угол между осью волоска и осью трубы, H - расстояние от стенки трубы до корпуса робота.

Введем продольный и поперечный коэффициенты упругости волоска.

$$k_x = \frac{\pi R^2 E}{L}$$

(2.1)

$$k_y = \frac{3EI}{L^3}$$

где R - радиус ворсинки, E - модуль Юнга материала ворсинки, I - момент инерции поперечного сечения ворсинки.

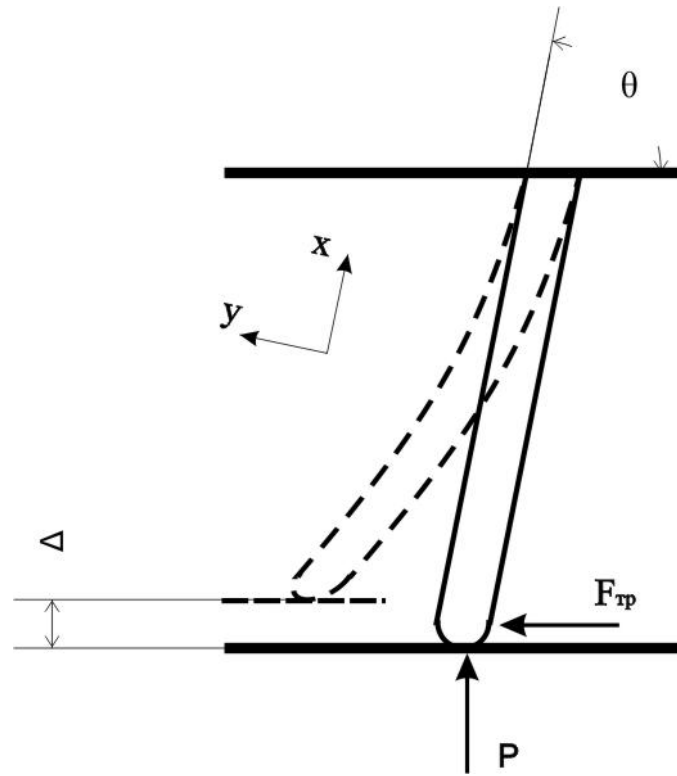


Рис. 2.20. Изгиб волоска.

Отношение коэффициентов жесткости обозначим посредством $s = \frac{k_x}{k_y}$.

Заметим, что для цилиндрической ворсинки $I = \frac{\pi R^4}{4}$, следовательно $s = \frac{4L^2}{3R^2}$.

Пусть P - сила упругого сжатия волоска при отсутствии движения робота. Смещение кончика волоска вдоль его оси и перпендикулярно ей $\Delta_x = (P \sin \theta)/k_x$ и $\Delta_y = (P \cos \theta)/k_y$. Результирующее смещение перпендикулярно поверхности

$$\Delta = \Delta_x \sin \theta + \Delta_y \cos \theta = P \left(\frac{\sin^2 \theta}{k_x} + \frac{\cos^2 \theta}{k_y} \right)$$

(2.2)

Будем считать, что сила, действующая вдоль ворсинки, достаточно мала для того чтобы произошел ее продольный прогиб. Продольный изгиб произойдет, если продольная сжимающая сила достигнет величины критической силы Эйлера, т.е. должно выполняться следующее условие

$$P \sin \theta < \frac{\pi^3 R^4 E}{16L^2} \quad (2.3)$$

выразив из(2.2) P и подставив в (2.3) получим ограничение на величину относительной деформации волоска $\varepsilon = \Delta/L \sin \theta$

$$\varepsilon < \frac{\pi^2 (tg^2 \theta + s)}{12s tg^2 \theta}.$$

Кроме того, в силу постановки задачи $0 < \varepsilon < 1$.

График функции $f(\theta) = \frac{\pi^2 (tg^2 \theta + s)}{12s tg^2 \theta}$ представлен на рис. 2.21

Пусть теперь робот движется вперед («по ворсу») с постоянной скоростью, тогда на кончик ворсинки действует сила сжатия P_1 и сила трения $F_1 = \mu P_1$, здесь μ - коэффициент трения между ворсинкой и поверхностью. Смещение вдоль оси ворсинки $\Delta_{x1} = (P_1 \sin \theta - F_1 \cos \theta)/k_x$, перпендикулярно ей $\Delta_{y1} = (P_1 \cos \theta + F_1 \sin \theta)/k_y$. При этом

если $\mu > tg \theta$, то ворсинка растягивается,

если $\mu = tg \theta$, то ворсинка не сжимается, а только изгибается,

если $\mu < tg \theta$, то ворсинка сжимается.

Результирующее смещение в этом случае останется тем же, т. к. оно зависит лишь от геометрии робота и трубы.

$$\Delta = P_1 \left(\frac{\sin^2 \theta}{k_x} + \frac{\cos^2 \theta}{k_y} \right) + \mu P_1 \sin \theta \cos \theta \left(\frac{1}{k_y} - \frac{1}{k_x} \right).$$

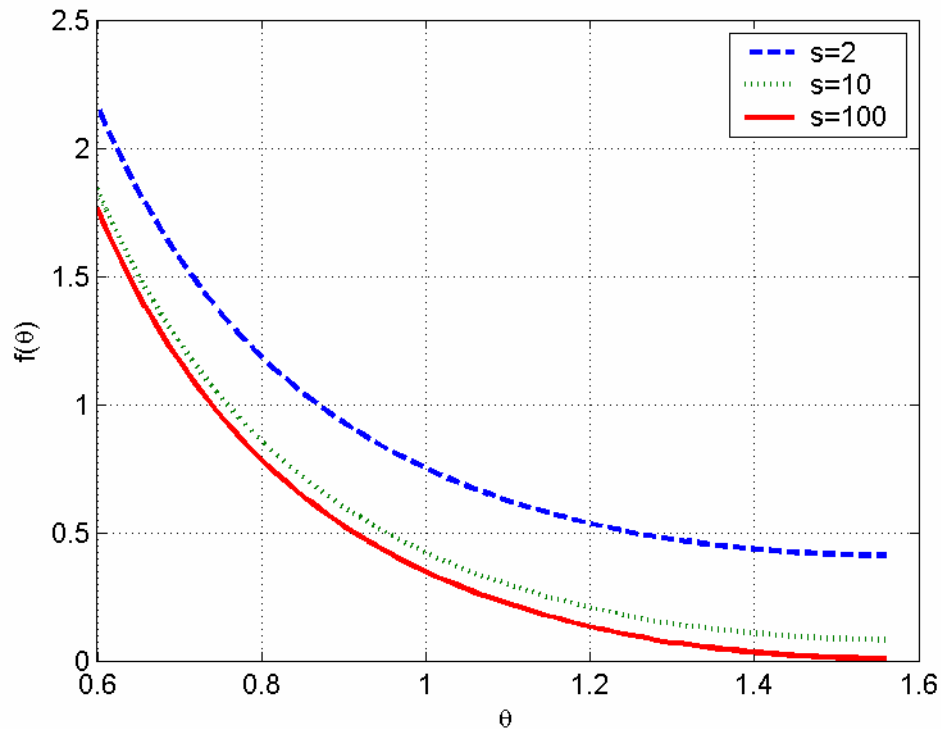


Рис. 2.21. К определению условия осуществления продольного изгиба.

Модуль силы трения, действующей на ворсинку

$$F_1 = \frac{k_x \Delta (1 + \operatorname{tg}^2 \theta) \mu}{\operatorname{tg}^2 \theta + \mu (s - 1) \operatorname{tg} \theta + s}.$$

Аналогичным образом вычисляется абсолютная величина силы трения, действующей на ворсинку, при движении назад («против ворса»)

$\Delta_{x2} = (P_2 \sin \theta + F_2 \cos \theta) / k_x$, $\Delta_{y2} = (P_2 \cos \theta - F_2 \sin \theta) / k_y$. При этом если $\mu > \operatorname{ctg} \theta$, то ворсинка изгибается вправо (против хода движения), если $\mu = \operatorname{ctg} \theta$, то ворсинка не изгибается, если $\mu < \operatorname{ctg} \theta$, то ворсинка изгибается влево (по ходу движения).

$$F_2 = \frac{k_x \Delta (1 + \operatorname{tg}^2 \theta) \mu}{\operatorname{tg}^2 \theta - \mu (s - 1) \operatorname{tg} \theta + s}$$

(2.4)

Так как мы считаем, что $P_2 > 0$, то знаменатель в выражении для силы трения в обратном направлении должен быть положителен. Это выполняется, если

$$\mu < \frac{tg^2\theta + s}{(s-1)tg\theta} = f_1 \quad (2.5)$$

в том случае, если это условие не выполняется, то ворсинки являются слишком мягкими для того, чтобы обеспечить давление на стенки трубы при скольжении «против ворса».

Условие, при котором не произойдет продольного изгиба ворсинки

$$P_2 \sin \theta + F_2 \cos \theta < \frac{\pi^3 R^4 E}{16L^2} \quad (2.6)$$

подставив F_2 из (2.4), и используя соотношение $F_2 = \mu P_2$, получим

$$\mu < \frac{\pi^2 (tg^2\theta + s) - 12s\epsilon tg^2\theta}{(12s\epsilon + \pi^2 (s-1))tg\theta} = f_2.$$

Полученное условие, накладываемое на коэффициент трения более жесткое, чем (2.5). Это означает, что при $\epsilon > 0$, $0 < \theta < \pi/2$, $s > 1$ ворсинка потеряет продольную устойчивость при меньшем коэффициенте трения, чем определенным условием (2.5). Графики функций f_1 и f_2 в сравнении с $ctg(\theta)$ для $s = 5$, $\epsilon = 0,3$ приведены на рис. 2.22.

Отношение модулей сил трения при движении назад и вперед

$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{tg^2\theta + \mu(s-1)tg\theta + s}{tg^2\theta - \mu(s-1)tg\theta + s}.$$

Из формулы (2.6) следует, что продольного изгиба не произойдет, если

$$\frac{F_2}{F_1} < \frac{\pi^2 (tg^2\theta + \mu(s-1)tg\theta + s)}{12s\epsilon tg\theta (tg\theta + \mu)} = f_e$$

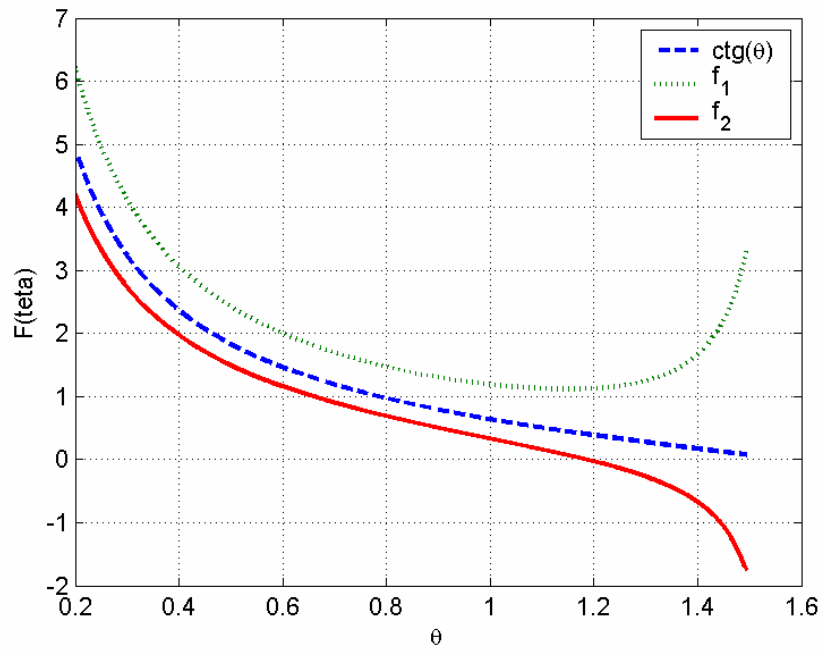


Рис. 2.22. Ограничения, накладываемые на коэффициент трения.

Зависимость отношения F_2/F_1 от θ для $\mu = 0.5$ изображена на рис.

2.23.

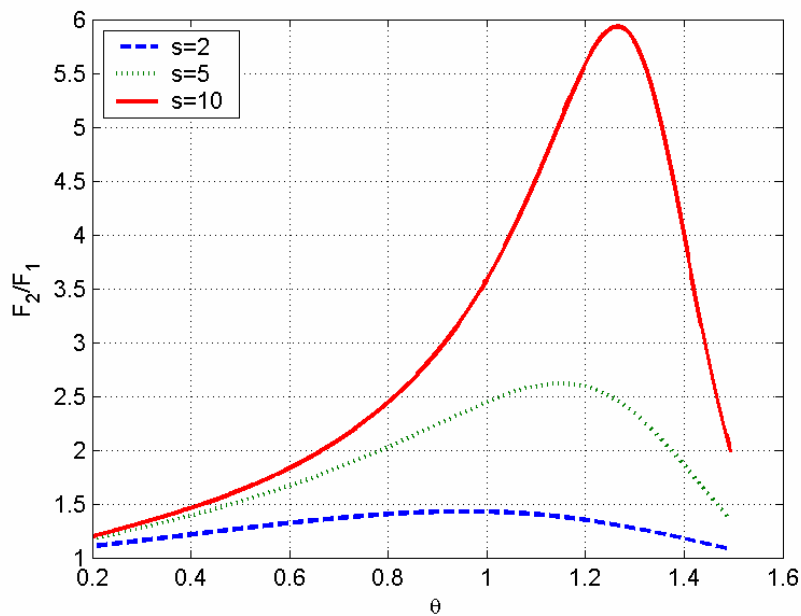


Рис. 2.23. Отношение сил трения в обратном и прямом направлении движения ($\mu = 0,5$).

Если ворсинки окажутся слишком мягкими, то потеря устойчивости произойдет при меньшем угле θ , чем тот, при котором будет максимально отношение $\frac{F_2}{F_1}$. При потере устойчивости сжатие волоска осуществляется

гораздо легче, чем в случае его устойчивого состояния, поэтому сила трения F_2 после потери устойчивости будет уменьшаться, т.к. уменьшится сила нормального давления со стороны стенки трубы. На рис. 2.24 показана зависимость $f_e(\theta)$ для различных величин относительного сжатия ворсинки.

Также на этом графике изображена зависимость $\frac{F_2}{F_1}(\theta)$ для $\mu = 0,5$ и $s = 10$.

При увеличении угла наклона ворсинки к поверхности отношение сил трения в обратном и прямом направлениях будет увеличиваться до тех пор, пока ворсинка не потеряет устойчивость. Это произойдет в точке пересечения графиков $f_e(\theta)$ и $\frac{F_2}{F_1}(\theta)$. Если потери устойчивости не происходит (для ε

близких к нулю), то отношение $\frac{F_2}{F_1}$ достигает своего максимума и убывает

при дальнейшем увеличении угла. При $\theta = \pi/2$ анизотропии по трению наблюдаться не будет в силу симметрии системы при движении в прямом и обратном направлениях.

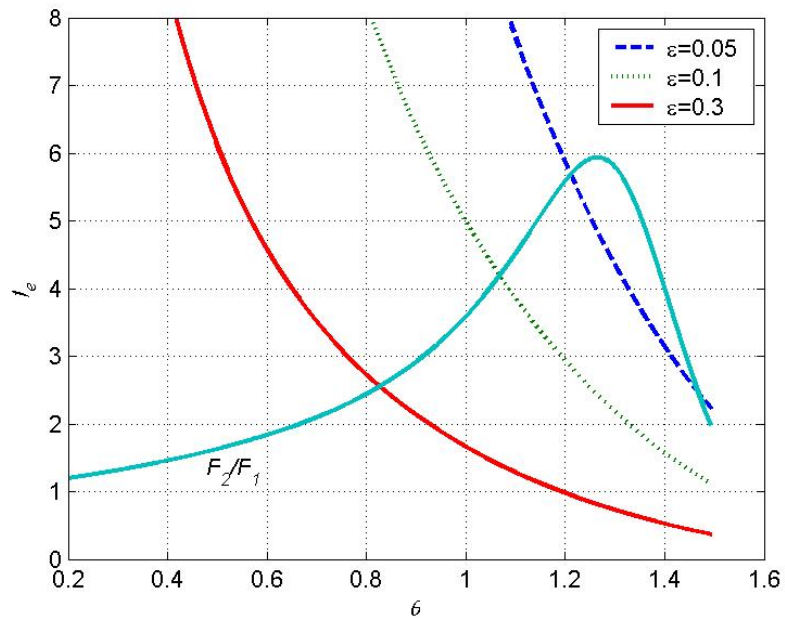


Рис. 2.24 Максимальное отношение сил трения в прямом и обратном направлении с учетом устойчивости ворсинки.

3. НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ ПОКРЫТИЯ КОНТАКТНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ

3.1. Требования к материалам для покрытия контактных поверхностей роботов.

Составляющие конструкции робота, контактирующие с поверхностью, по которой движется робот, могут быть двух типов.

1. Контактная поверхность двигателей робота.
2. Контактные поверхности уплотнений и различных датчиков.

В первом случае на контактной поверхности необходимо наличие трения, во втором случае трение обычно нежелательно и его требуется минимизировать.

Если от робота требуется перемещение по вертикальным поверхностям, то ему необходимо наличие прижимающей к поверхности силы.

Если поверхность по которой нужно перемещаться ферромагнитная, то удерживающая на поверхности сила может быть электромагнитной, в таком случае контактная поверхность может быть торцом ферромагнитного сердечника, либо быть поверхностью постоянного магнита.

Самым распространенным способом прикрепления к немагнитным поверхностям стало использование вакуумных захватов. Контактная поверхность вакуумного захвата шагающего робота должна быть достаточно податливой, чтобы хорошо облегал неровности поверхности и обеспечивать герметичность в рабочей полости захвата. В то же время коэффициент трения между материалом присоски вакуумного захвата и поверхностью должен быть по возможности максимальным, чтобы исключить проскальзывание робота. В так называемом скользящем уплотнении напротив, поверхность соприкосновения должна иметь минимальный

коэффициент трения, а коэффициент трения скольжения движителей должен быть максимальным. Но материал скользящего уплотнения должен быть и податливым, т.к. нужно минимизировать зазор между скользящим уплотнением и поверхностью для уменьшения подсоса воздуха извне.

Возможно также механическое прикрепление к поверхности, например с использованием микрокрючков, которые цепляются за неровности поверхности. Материал крючков в этом случае должен быть достаточно твердым, а их размер достаточно малым.

Еще один способ прикрепления к поверхности – это использование межмолекулярного взаимодействия между контактной поверхностью устройства сцепления и поверхностью по которой нужно перемещаться. Чтобы увеличить влияние межмолекулярного взаимодействия, нужно максимизировать площадь соприкосновения с поверхностью. Для этого материал контактной поверхности устройства сцепления должен быть достаточно податлив, чтобы повторять макронеровности поверхности (например ее волнистость), либо устройство сцепления должно быть снабжено пальцами, каждый из которых имеет небольшую площадь соприкосновения, пальцы же должны иметь возможность ориентироваться так, чтобы контактные площадки пальцев были параллельны соответствующему участку на поверхности. Кроме того поверхность обладает микронеровностями (шероховатостью). Максимизировать площадь соприкосновения с учетом шероховатости поверхности позволит использование «липких» материалов с малыми значениями модуля упругости, например эластомеров, либо исполнение контактной поверхности в виде щетки, ворсинки которой, имеющие размеры микрометрового диапазона, будут изгибаться в соответствии с неровностями поверхности, таким способом прикрепления в совершенстве владеет небольшая ящерица – геккон. Ворсинки такой «щетки» с одной стороны должны располагаться как можно плотнее для максимизирования площади соприкосновения с

поверхностью, но с другой стороны, должно исключаться их слипание, т.к. это будет равносильно уменьшению количества контактирующих ворсинок.

Если робот движется в ограниченном замкнутом пространстве (например в трубе), то прижимающую к поверхности силу можно обеспечить при помощи использования устройств упирающихся во внутренние стенки. Коэффициент трения между контактными поверхностями устройств и стенками должен быть достаточен, чтобы исключить проскальзывание робота. В случае когда контактные поверхности соприкасаются со стенками на протяжении всего движения, то движение робота может быть осуществлено только за счет движения внутренних масс, при этом трение контактных поверхностей движителей робота может обладать как изотропным, так и анизотропным трением, зависящем от направления движения. В случае анизотропного трения коэффициент трения в направлении движения должен быть минимален и максимален в обратном направлении.

3.2. Сухой адгезионный материал для устройств сцепления с поверхностью в робототехнике.

3.2.1. Биологические адгезивы.

Природа сил, удерживающих геккона на поверхности.

Многие насекомые и ящерицы обладают умением бегать по потолку и отвесным стенам [28,29]. Еще со времен Аристотеля [30] известна необыкновенная способность некоторых ящериц ползать по различным поверхностям. Самыми способными из таких ящериц оказались гекконы. Они с легкостью бегают по любым видам стен, по деревьям и даже по стеклу. При этом геккон может двигаться как по горизонтальной, так и по вертикальной поверхности и даже свисать с потолка, удерживая себя при этом всего одним пальцем.

Табл. 3.1. Способность различных ящериц к прикреплению к поверхности.

Вид	Масса тела, г	Общая площадь подошв, мм ²	Сила отрыва от поверхности, Н
<i>Hemidactylus frenatus</i>	3.0 ± 0.21	25.3 ± 1.34	1.0 ± 0.08
<i>Hemidactylus turcicus</i>	2.1 ± 0.28	21.5 ± 1.69	0.8 ± 0.24
<i>Gehyra oceanica</i>	7.9±0.50	69.1±3.22	4.7±0.31
<i>Gehyra multilata</i>	1.7±0.09	18.1±1.17	0.8±0.04
<i>Lepidodactylus luqubris</i>	8 1.4±0.05	12.1±0.58	0.9±0.09
<i>Gekko gecko</i>	43.4±1.48	227.1±10.81	20.04±1.33
<i>Anolis carolinensis</i>	5.5±0.52	30.1±2.20	1.5±0.13
<i>Anolis sagrei</i>	4.4±0.48	21.4±1.69	1.3±0.19
<i>Anolis leachi</i>	18.1±2.05	60.8±5.64	4.9±0.79
<i>Anolis grahami</i>	6.9±0.34	35.9±1.61	2.5±0.26
<i>Prasinohaema virens</i>	3.1±0.13	18.9±1.77	0.4±0.05
<i>Prasinohaema prehensicauda</i>	7.1±0.90	21.1±1.24	0.2±0.01
<i>Prasinohaema flavipes</i>	23.9±1.73	52.5±1.89	0.8±0.65

В работе [31] проведен сравнительный анализ способности различных ящериц к сцеплению с поверхностью. В табл. 3.1 приведены значения сил, удерживающих ящерицу на поверхности для разных видов ящериц [31].

Знание механизма сцепления геккона с поверхностью может помочь при конструировании новых типов устройств для сцепления минироботов с поверхностью. Наибольший интерес при этом представляет изучение механизма сцепления с поверхностью геккона (*Gekko gecko*). При довольно большой массе тела (несколько десятков граммов) он обладает одной из наилучших способностей прикрепляться к поверхности (см. табл. 3.1). Геккон не имеет никаких желез на своих подошвах [32], которые могли бы выделять некую клейкую жидкость. К тому же он с одинаковой легкостью перемещается как по сухим, так и по влажным поверхностям. В связи с этим было сделано предположение, что сцепление подошвы геккона с поверхностью происходит главным образом за счет сил Ван-дер-Ваальса [32 - 34].

Пальцы геккона были исследованы с помощью сканирующего электронного микроскопа. Обнаружено, что они покрыты рядами микроворсинок (*seta*) длиной порядка 30 - 130 мкм и диаметром около 5 мкм (см. рис. 3.1). Каждая микроворсинка разветвляется на 100 – 1000 нановорсинок (*spatulae*) диаметром 0,2 – 0,5 мкм, которые на кончике расширяются в виде лопаточек [32-34]. Также обнаружено, что ворсинки состоят из β - кератина, имеющего модуль Юнга, равный 1 - 4 Гпа. Этот материал существенно не смачиваем, и имеет краевой угол смачивания водой порядка 160° . Сила притяжения лапы геккона к поверхности $10 \frac{H}{см^2}$. В работе [32] показано, что основной вклад в притяжение ворсинок к поверхности вносят силы межатомного притяжения, так называемые силы Ван-дер-Ваальса. При взаимодействии сферы радиуса R с плоской поверхностью сила Ван-дер-Ваальса выражается зависимостью [35]

$$f = \frac{A_{12}R}{6D^2}$$

где A_{12} - константа Гамакера для взаимодействия материала сферы с материалом поверхности, D - расстояние от кончика сферы до поверхности.

Сила притяжения, рассчитанная по этой формуле, находится в хорошем согласовании с реально измеренными величинами для различных материалов [32-34].

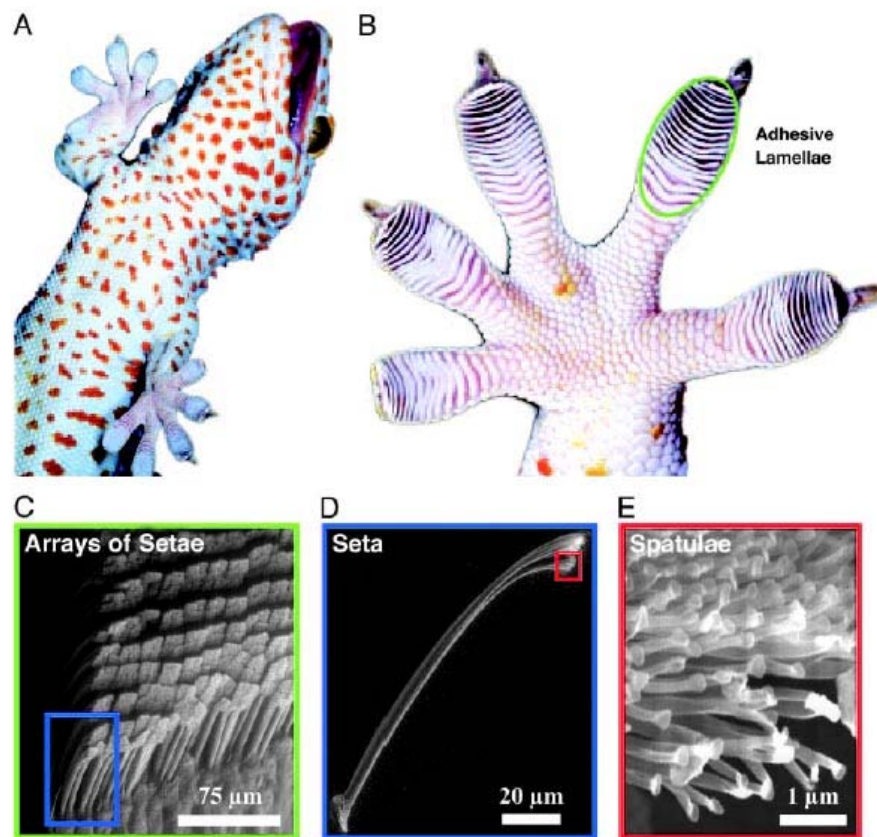


Рис. 3.1. Строение подошвы пальцев геккона.

При проведении экспериментов с одной микроворсинкой геккона было выяснено, что сила отрыва ворсинки от поверхности зависит от силы

предварительного прижима ворсинки к поверхности, а также от угла наклона ворсинок к нормали поверхности [34].

Возникает вопрос. Как геккон может настолько быстро отрывать лапы от поверхности? Ведь при этом он прикладывает совершенно незначительные усилия. В работе [36] приведены результаты экспериментального исследования динамики движения геккона по вертикальной поверхности. Скорость движения геккона по вертикальной стенке достигает 77 см/с с частотой шага 15 Гц. Сила, которую прикладывает геккон для отрыва лапы от поверхности имеет порядок 0.01 Н. Выяснено, что при движении геккон попеременно отрывает левую переднюю и правую заднюю или правую переднюю и левую заднюю лапы. Отрыв лапы от поверхности происходит постепенно, а не сразу по всей площади соприкосновения лапы с поверхностью. При этом пальцы геккона выгибаются по направлению от поверхности соприкосновения (см. рис. 3.2).

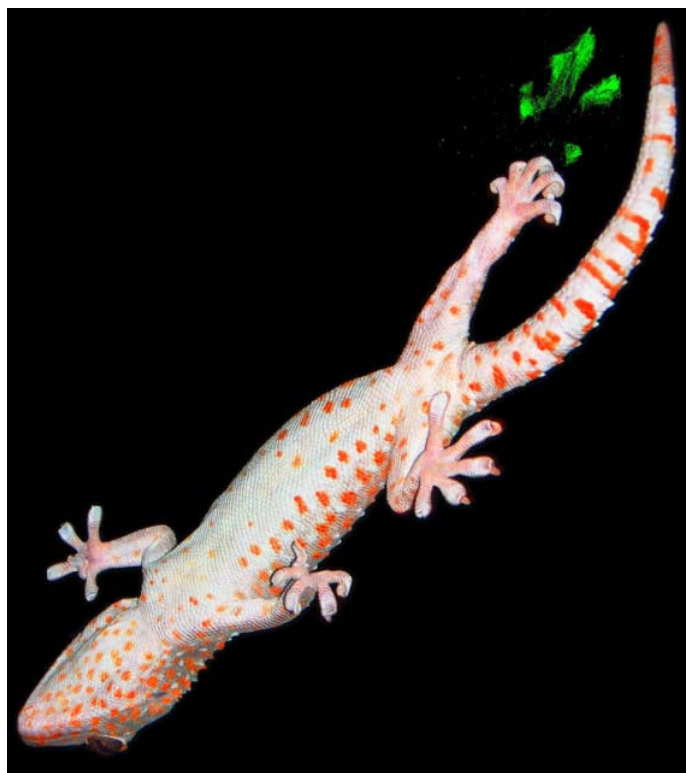


Рис. 3.2. Способ отрыва лапы от поверхности.

Также при движении геккон прижимается к поверхности, чтобы приблизить к ней свой центр масс и уменьшить опрокидывающий момент.

Самоочищение щетинок геккона.

Гекконы не предпринимают никаких действий, чтобы очистить свои лапы от прилипшей грязи, но, тем не менее, сохраняют способность бегать по стенам на протяжении нескольких месяцев между линьками. Одной из причин такого самоочищения лап геккона является существенная несмачиваемость материала щетинок – кератина. Частилки грязи стекают вместе с жидкостью по поверхности лап геккона (так называемый «эффект лотоса») [37,38]. Этот факт также препятствует слипанию щетинок за счет капиллярного взаимодействия между ними. Для оценки угла смачивания поверхности могут быть использованы уравнения Венцеля [39] или Касси [40,44], которые учитывают влияние шероховатости твердых поверхностей на угол смачивания их жидкостями. В модели Касси принимается во внимание воздух, задерживаемый под каплей, что лучше учитывает особенности смачивания поверхности ворсистых материалов. В этой модели краевые углы смачивания ворсистой структуры ϑ' и плоской поверхности ϑ из одного и того же материала, связаны соотношением:

$$\cos \vartheta' = S_1 \cos \vartheta + S_1 - 1,$$

где S_1 - доля поверхности, покрытой ворсинками. Эта формула показывает, что ворсинки делают гидрофобные поверхности более гидрофобными, а гидрофильные – более гидрофильными. Таким образом, для повышения водоотталкивающих свойств ворсистой поверхности нужно выбирать гидрофобный материал. В работе [41] приведены результаты эксперимента по определению угла смачивания для ворсистого материала на лапах геккона. На рис. 3.3 показаны фотографии, иллюстрирующие контакт капли с ворсистым и с неструктурированным материалом.

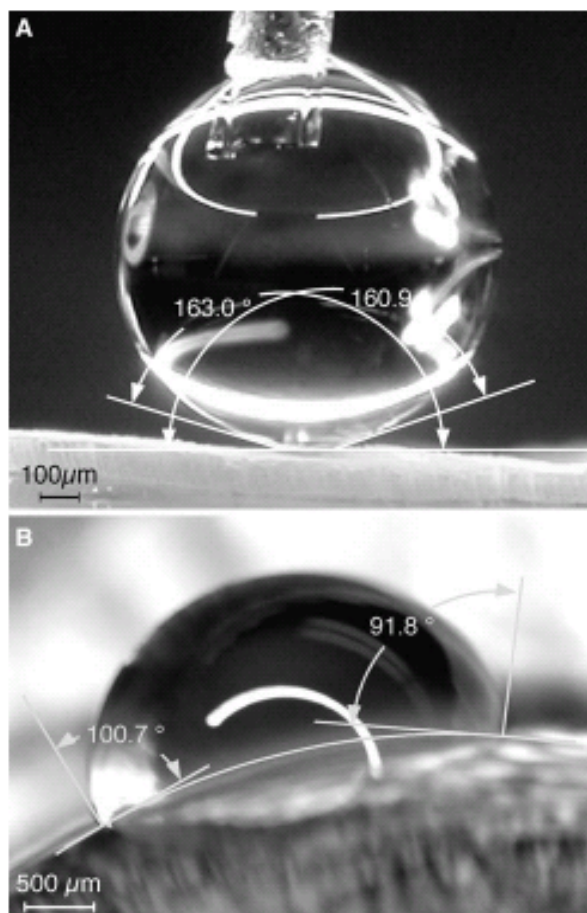


Рис. 3.3. Смачивание ворсистого материала пальцев геккона (А) и неструктурированного β-кератина, взятого у геккона [41].

В работе [37] также рассмотрен еще один механизм самоочищения щетинок. Авторы обнаружили, что при «загрязнении» ворсинок геккона частицами «грязи», средний радиус которых $R_q = 2,5 \text{ мкм}$, после нескольких прикреплений к поверхности ворсинки самоочищаются. Авторы ввели коэффициент, характеризующий способность геккона прикрепляться к поверхности

$$R(n) = \frac{F_n - F_{грязн}}{F_{чист} - F_{грязн}},$$

где F_n , $F_{грязн}$, $F_{чист}$ силы отрыва лапы геккона от поверхности на n-ом шаге, при грязной поверхности лапы и при чистой поверхности соответственно. Зависимость этого коэффициента от количества прикреплений показана на рис.3.4.

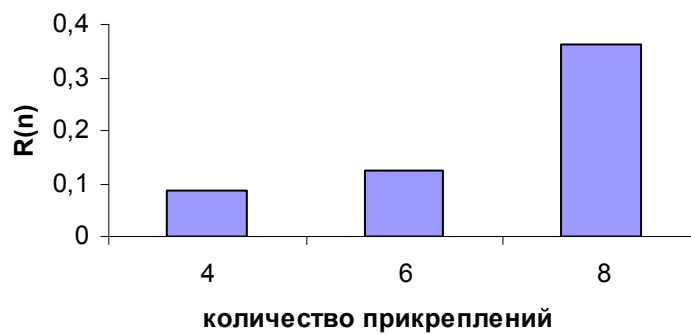


Рис. 3.4. Зависимость способности «загрязненного» пальца геккона прикрепляться к поверхности от количества прикреплений.

Сила адгезионного притяжения частицы грязи к плоской поверхности [35]

$$F_{\text{чн}} = \frac{A_{\text{чн}} R_{\text{ч}}}{6D_{\text{чн}}^2}.$$

Сила адгезионного притяжения между частицей и нановорсинкой

$$F_{\text{чн}} = \frac{A_{\text{чн}} R_{\text{ч}} R}{6D_{\text{чн}}^2 (R_{\text{ч}} + R)}, \text{ где } D - \text{ это расстояние между взаимодействующими}$$

телами, A - константы Гамакера для соответствующих материалов. Константа Гамакера для материалов, взаимодействующих через воздух, вычисляется по формуле [35]

$$A_{\text{чн}} \approx \sqrt{A_{\text{ч}} A_{\text{н}}}$$

Частица грязи притянется к лапе геккона, если количество нановорсинок, взаимодействующих с ней, будет

$$N_{\epsilon} > \frac{F_{\text{чн}}}{F_{\text{чн}}} = \left(1 + \frac{R_{\text{ч}}}{R}\right) \frac{A_{\text{чн}} D_{\text{чн}}^2}{A_{\text{чн}} D_{\text{чн}}^2}.$$

В [37] приведены результаты экспериментов по загрязнению лап геккона частицами грязи, которые представляют собой кремний-алюминивые микросферы имеющие радиус $R_c = 2,5 \text{ мкм}$. Константы Гамакера для указанных пар материалов не различаются более чем в два раза. Для оценки D_{ch} и D_{ch} можно принять равными, тогда при $R = 0,1 \text{ мкм}$, количество нановорсинок, необходимое для удержания частицы грязи будет как минимум $N = 13$ [37]. Проведенные исследования показали, что в большинстве случаев количество нановорсинок геккона, непосредственно контактирующих с поверхностью частицы грязи мало, это происходит за счет большой кривизны ее поверхности по сравнению с плоской поверхностью, к которой прикрепляется лапа геккона.

3.2.2. Искусственные адгезивы.

В настоящее время уже существуют гекко-подобные материалы [42 – 45]. В работе [42] описывается материал, созданный в Лаборатории эпитаксиальных структур Института проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов, г. Черноголовка. Материал из полиамида, изготовлен с помощью электронно-лучевой литографии и сухого травления в кислороде. При этом на пленке полиамида были получены волоски длиной 2 мкм и диаметром 0,5 мкм, с расстоянием между волосками 1,6 мкм. Сила притяжения, приходящаяся на один волосок, оказалась равной $\sim 70 \text{ нН}$, квадратный сантиметр такой поверхности притягивается с силой $3H$, что сравнимо с аналогичным показателем для геккона ($10 \frac{H}{\text{см}^2}$). Авторы отмечают, что при применении гибкого основания волосков эффективность прикрепления материала повышается примерно в 1000 раз по сравнению со случаем, когда основание твердое (см. рис. 3.5).



Рис. 3.5. Волоски, выращенные на гибком основании (а) и на твердом (б)

В работе [46] предложены три различных метода изготовления микроструктурированных адгезионных материалов. Первый - это формирование жидкого полимера, форма для которого изготавливается с помощью выдавливания углублений в воскоподобном материале иглой кантилевера атомно-силового микроскопа. Второй способ основан на использовании поликарбонатной мембраны с нано-отверстиями в качестве формы для литья. С помощью такого способа изготовлены волоски высотой 5 мкм и диаметром 0,6 мкм. Этот же способ может быть применен для изготовления многоуровневых структур волосков (см. рис. 3.6).

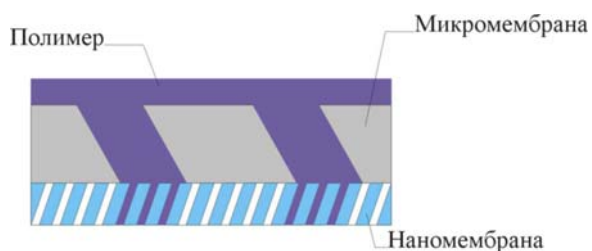


Рис. 3.6. Изготовление полимера с многоуровневой структурой волосков с помощью мембран с различными диаметрами пор.

Также способ литья полимерных наноструктур рассмотрен в [47].

Третий способ основан на вытягивании микроволосков из толщи полимера с помощью постоянного электрического поля (см. рис. 3.7) Тонкий слой полимера помещается между двумя плоскими электродами. Один из электродов начинает удаляться, увлекая за собой часть полимера, который вытягивается в столбики по мере удаления электрода. При этом длина и угол наклона волосков определяются вертикальным и горизонтальным смещением подвижного электрода.

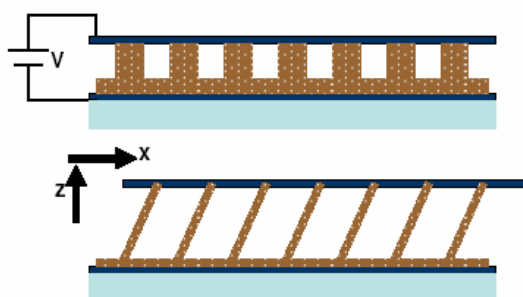


Рис. 3.7. Выращивание полимерных волосков с помощью электрического поля. Регулирование высоты и угла наклона волосков с помощью вертикального z и горизонтального x смещения.

В работе [48] предложен метод изготовления полимерных наноструктур с помощью лазерного пинцета.

Также было предложено использование многослойных нанотрубок (multiwalled carbon nanotubes MWCNT) в качестве волосков в микроструктуре сухого адгезионного материала [45]. Нанотрубки довольно податливы при поперечном изгибе и после снятия нагрузки восстанавливают прежнюю форму. Длина таких волосков достигает 5-10 мкм, диаметр порядка 20-30 нм, плотность их расположения на основании $10^{10} - 10^{11}$ волосков/см². Сила адгезии для такого материала достигает значения 11,7 Н/см² при взаимодействии с поверхностью стекла [45]. Сравнение сил адгезии для

некоторых природных и искусственных микро/ наноструктурных материалов приведено в табл. 3.2.

В то время как для полимерных волосков основной проблемой зачастую становится их слипание между собой и излом при изгибающей нагрузке, что приводит к уменьшению адгезии. Для многослойных нанотрубок более существенной стала проблема надежности их прикрепления к основанию (после нескольких прикреплений к поверхности часть нанотрубок остается на ней).

Табл. 3.2. Сравнение наноструктурированных адгезивных материалов при взаимодействии с поверхностью стекла.

ссылка на литературу	Материал	Модуль Юнга	Усилие отрыва (Н/см ²)	Сила предварительной нагрузки (Н/см ²)	Отношение усилия отрыва и предварительной нагрузки	Эффективный модуль Юнга(кПа)
[34] Autumn et al <i>Nature</i> 2000	β-кератин (геккон)	2 ГПа	10	<0.01	8-16	100
Ge et al <i>PNAS</i> 2007	углеродные нанотрубки на липкой ленте	1000 ГПа	5	25-50	<0.1	~200
[45] Zhao et al <i>J. Vac. Sci. Tech.</i> 2006	углеродные трубки на кремнии	1000 ГПа	11.7	>500	<0.01	~200

[49] Kim and Sitti <i>Applied Physics Letters</i> 2006	Полиуретан	3 МПа	18	12	1.5	~300
Gorb et al <i>JRS Interface</i> , 2006	PVS	3 МПа	0.06	2	2.9	~300
[43] Sitti and Fearing IEEE ICRA 2003	Полидиметилсиллоксан (PDMS)	0.5 МПа	0.003	0.025	0.1	~100
[42] Geim <i>Nature Materials</i> 2003	Полиимид	3 ГПа	0.03	50	0.06	3000 (без изгиба волосков)
Kustandi et al <i>Adv. Funct. Mat.</i> 2007	Parylene	2.8 ГПа	0.007	1	0.7	–
[50] Shan et al IEEE Nano/Micro 2006	PDMS	2.5 МПа	2	–	–	~240

Модель ворсистого адгезионного материала.

Предположим, что искусственный адгезионный материал изготовлен из полимерной подложки толщины b . На подложке выращены цилиндрические ворсинки под углом θ к плоскости подложки (см. Рис. 3.8). Длина каждой

ворсинки l , радиус R . Будем считать, что на свободном конце ворсинка имеет закругление в виде сферы радиуса R . Также предположим, что нагрузка направлена перпендикулярно подложке и распределяется по площади подложки равномерно. Свободными концами ворсинок направлены к опорной поверхности. Материал ворсинок и подложки один и тот же. Модуль упругости материала - E_1 , модуль упругости материала поверхности - E_2 , ν_1, ν_2 - коэффициенты Пуассона материалов ворсинок и поверхности соответственно. Эффективный модуль упругости для материала ворсинок и

материала поверхности $K = \frac{4}{3} \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)^{-1}$. Силу давления на адгезив

обозначим посредством F , тогда давление на материал $\sigma = F/S$, где S - площадь материала. Если на единицу площади материала приходится n ворсинок, сила, сжимающая каждую ворсинку $P = F/(nS) = \sigma/n$

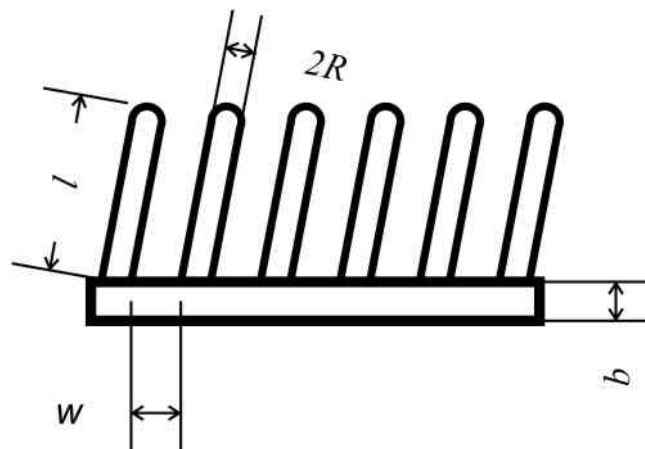


Рис. 3.8 Схематическое изображение адгезионного материала.

Рассмотрим теперь, как взаимодействует с поверхностью одна ворсинка.

Сила адгезионного притяжения шара к плоской поверхности определяется следующим образом [35]

$$f = \frac{A_{12}R}{6D^2}.$$

Здесь R - радиус шара, D - расстояние от шара до поверхности, A_{12} - постоянная, зависящая только от типа материалов шара и поверхности (константа Гамакера).

Для одного материала константа Гамакера выражается через поверхностную энергию $A_{11} = 24\pi\gamma_1 D_0^2$. $A_{12} \approx \sqrt{A_{11}A_{22}}$, поэтому $A_{12} = 24\pi D_0^2 \sqrt{\gamma_1\gamma_2}$. Работа адгезии $\sigma_0 = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12} \approx 2\sqrt{\gamma_1\gamma_2}$ [35].

Константа Гамакера A_{12} для большинства материалов имеет величину порядка 10^{-19} Дж, для существующих адгезионных материалов радиус одной ворсинки $R \approx 0.1 \div 0.6$ мкм, а ее длина $l \approx 2 \div 10$ мкм. Влияние силы адгезионного притяжения проявляется на очень малых расстояниях до поверхности (порядка межатомных $D_0 = 0.165$ нм). Величина шероховатости поверхности на несколько порядков выше этого значения. Например шероховатость полированного стекла ~ 0.1 мкм = 100 нм, поэтому можно считать, что сила адгезии начинает действовать только в момент непосредственного контакта с поверхностью, когда $D \approx 0$. При этом величина силы адгезионного притяжения равна $2\pi R\sigma_0$ в модели ДМТ (Дерягин Муллер Топоров) адгезии [51] и $\frac{3}{2}\pi R\sigma_0$ в модели ДКР (Джонсон Кендалл Робертс) [52].

Эффективный модуль одностороннего сжатия ворсистого материала.

Рассмотрим отдельно одну ворсинку (см. Рис. 3.9). Для начала будем считать, что сила трения равна нулю и на ворсинку действует только сила, действующая перпендикулярно поверхности. Введем для нее коэффициенты продольной и поперечной жесткости [43]

$$k_x = \frac{F_x}{\Delta_x}, \quad k_y = \frac{F_y}{\Delta_y}, \quad \text{где } \Delta_x \text{ и } \Delta_y \text{ - продольное и поперечное смещение}$$

конца балки, F_x , F_y - компоненты силы, приложенной к концу балки, вдоль соответствующих направлений. Смещение конца ворсинки при поперечном

изгибе $\Delta_y = \frac{F_y l^3}{3E_1 I}$ [53], здесь $I = \pi R^4/4$ - момент инерции круга. Смещение

при продольном сжатии найдем из закона Гука $\Delta_x = F_x l / (\pi R^2 E_1)$. Считаем, что не происходит продольного изгиба волоска, т.е. продольная сила меньше критической $F_y < \pi^2 E_1 I / (4l^2)$ [54]. Отношение коэффициентов жесткости

$$s = \frac{k_x}{k_y} = \frac{4l^2}{3R^2}. \quad \text{В нашем случае } F_x = P \sin \theta, \quad F_y = P \cos \theta.$$

Суммарное смещение перпендикулярно поверхности

$$\Delta = \Delta_x \sin \theta + \Delta_y \cos \theta = \frac{Pl}{\pi R^2 E_1} \left(\sin^2 \theta + \frac{4l^2}{3R^2} \cos^2 \theta \right).$$

Коэффициент жесткости ворсинки в этом направлении

$$k = \frac{\pi R^2 E_1}{l} \left(\sin^2 \theta + \frac{4l^2}{3R^2} \cos^2 \theta \right)^{-1}.$$

Введем эффективный модуль одностороннего сжатия

наноструктурированного материала. $E_{eff} = \frac{\sigma}{\varepsilon}$ [55], где σ - сила,

действующая на единицу площади материала в направлении перпендикулярном поверхности. ε - его относительное сжатие в этом направлении ($\varepsilon = \Delta / (l \sin \theta)$).

$$E_{eff} = \frac{\pi R^2 E_1 n \sin \theta}{\left(\sin^2 \theta + s \cos^2 \theta \right)}$$

Пусть теперь на кончик ворсинки действует сжимающая сила P , а также сила сухого трения F_{mp} (см. рис. 3.9), тогда

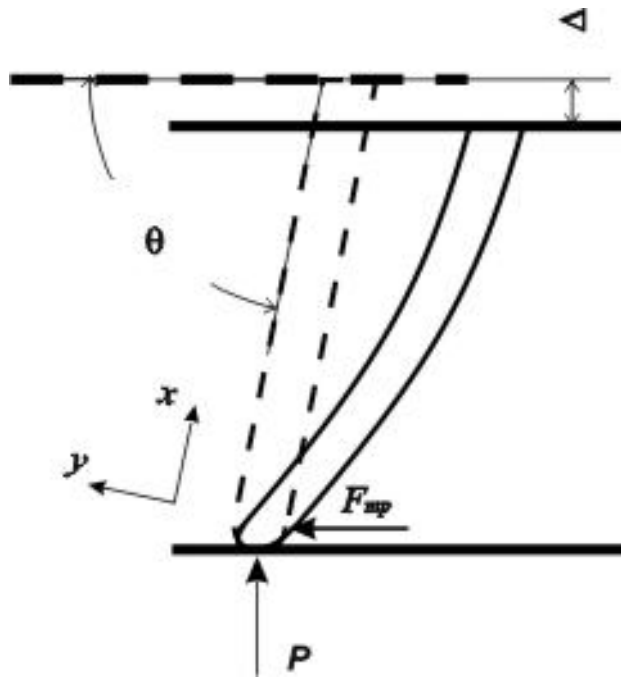


Рис. 3.9. Изгиб ворсинки.

$$F_x = P \sin \theta - F_{mp} \cos \theta, \quad F_y = P \cos \theta + F_{mp} \sin \theta.$$

Суммарное смещение перпендикулярно поверхности

$$\begin{aligned} \Delta &= \Delta_x \sin \theta + \Delta_y \cos \theta = \\ &= \frac{1}{k_x} (P \sin^2 \theta - F_{mp} \cos \theta \sin \theta) + \frac{1}{k_y} (P \cos^2 \theta + F_{mp} \sin \theta \cos \theta) \end{aligned}$$

Дерягиным Б. В., была предложена двучленная форма записи, учитывающая адгезионное притяжение материала к поверхности для силы трения [56].

Выражение для силы трения в этом случае записывается в следующем виде:

$$F_{mp} = \mu(P + f_0), \quad \text{где } f_0 \text{ - сила адгезионного притяжения ворсинки к}$$

поверхности, μ - коэффициент сухого трения. При скольжении ворсинки в

направлении ее наклона (вправо на рис. 3.9) $F_{mp1} = +\mu(P_1 + f_0)$, при

скольжении в обратном направлении $F_{mp2} = -\mu(P_2 + f_0)$, где P_1, P_2 - силы,

прижимающие материал к поверхности при скольжении «по ворсу» и

«против ворса» соответственно. Таким образом, эффективный модуль

одностороннего сжатия ворсистого материала зависит от направления скольжения ворсистого материала.

Сила, сжимающая ворсинку при скольжении «по ворсу»

$$P_1' = \frac{\Delta k_x (tg^2 \theta + 1) - \mu f_0 tg \theta (s - 1)}{tg^2 \theta + (s - 1) \mu tg \theta + s}$$

при скольжении «против ворса»

$$P_2 = \frac{\Delta k_x (tg^2 \theta + 1) + \mu f_0 tg \theta (s - 1)}{tg^2 \theta - (s - 1) \mu tg \theta + s}$$

При скольжении «против ворса» ворсинка не потеряет устойчивость, если

$$P_2 < \frac{\frac{\pi^3 R^4 E}{16L^2 \cos \theta} - \mu f_0}{tg \theta + \mu}, \text{ или } \mu < \frac{\frac{\pi^2}{3s} (tg^2 \theta + s) - 4\varepsilon tg^2 \theta}{\frac{(\sqrt{3s})^3 \sigma_0}{El \cos \theta} + tg \theta \left(4\varepsilon + \frac{\pi^2}{3s} (s - 1) \right)} = \mu_b$$

относительное сжатие $\varepsilon = \frac{\Delta}{l \sin \theta}$, Δ имеет порядок шероховатости поверхности (0,1 мкм для стекла) На рис. 3.10 показана зависимость $\mu_b(\theta)$

для следующих значений параметров:

$s = l = 110 \text{ мкм}$, $R = 2.1 \text{ мкм}$, $\sigma_0 = 0,049 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2}$, $E_1 = 2 \text{ ГПа}$. Если не

учитывать влияние адгезионного притяжения ворсинки $f_0 = 0$, то

$$E_{ff1} = \frac{k_x (1 + tg^2 \theta) nl \sin \theta}{tg^2 \theta + \mu (s - 1) tg \theta + s} \text{ при движении «по ворсу»,}$$

$$E_{eff2} = \frac{k_x (1 + tg^2 \theta) nl \sin \theta}{tg^2 \theta - \mu (s - 1) tg \theta + s} \text{ при движении «против ворса»}$$

В работе [55] было получено выражение для эффективного модуля одностороннего сжатия при $k_x \rightarrow \infty$, т.е. считалось, что ворсинка не сжимается вдоль своей оси. Сравнение зависимостей модулей сжатия от угла наклона ворсинки при различных допущениях приведено на рис. 3.11.

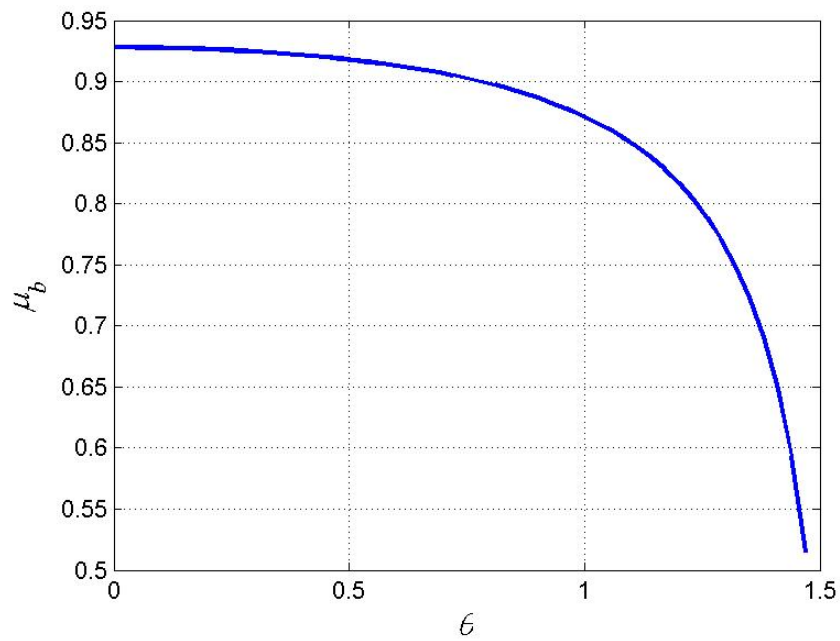


Рис. 3.10. Коэффициент трения, при котором произойдет потеря устойчивости

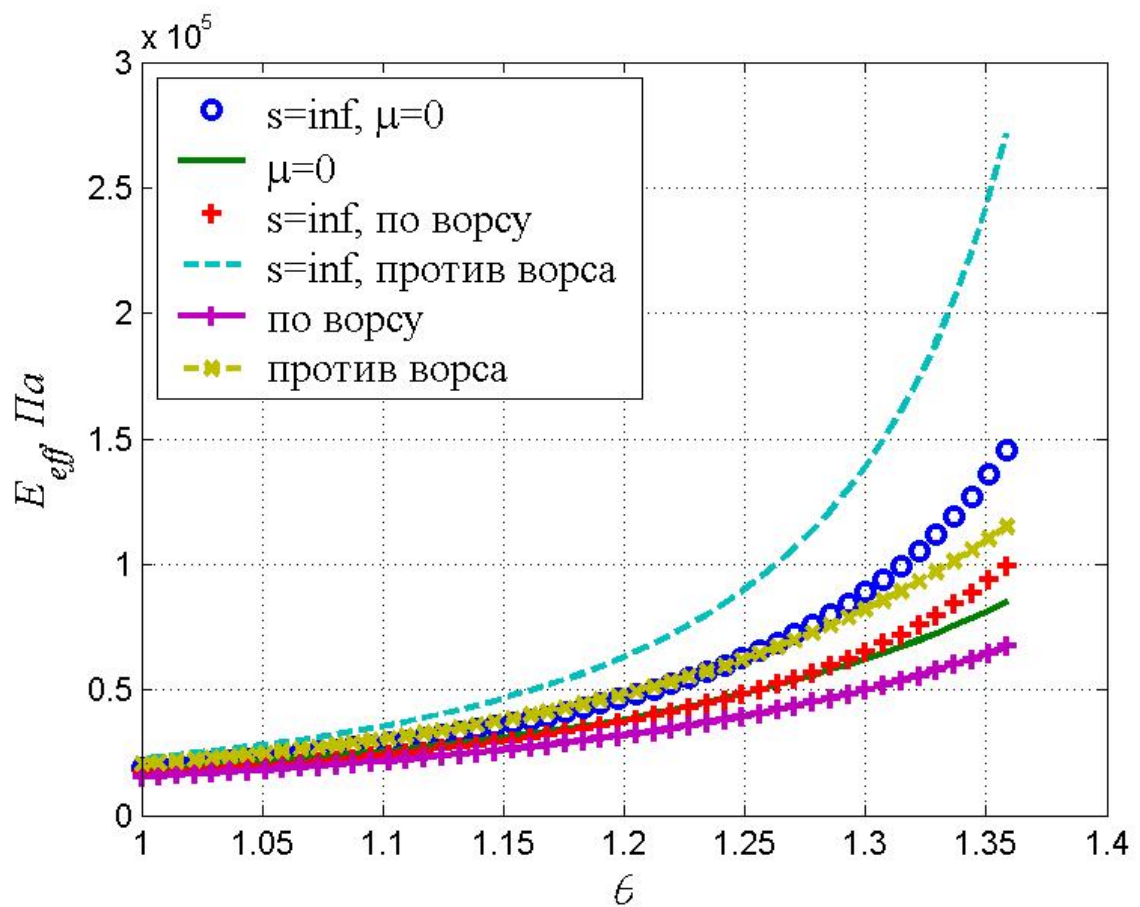


Рис. 3.11 Эффективный модуль одностороннего сжатия.

Модель взаимодействия с шероховатой поверхностью

При проведении экспериментов с одной микроворсинкой геккона было выяснено, что сила отрыва ворсинки от поверхности зависит от силы предварительного прижима к поверхности, а также от угла наклона ворсинки к поверхности [5]. Необходимость предварительной нагрузки обусловлена шероховатостью поверхности, для того чтобы обеспечить более тесный контакт микроворсинки с поверхностью, необходимо посредством предварительной нагрузки деформировать нановорсинки, которые попали на выступы микронеровностей поверхности. Сила предварительной нагрузки, отнесенная к единичной площади, необходимая для полного контакта модели микроворсинки (показанной на рис. 3.12) с волнистой поверхностью, которая имеет профиль описываемый функцией $f(x) = A \sin^2\left(\frac{\pi x}{\lambda}\right)$ равна

$$\sigma = \frac{\pi E_1 h}{2(1 - \mu_1^2) \lambda} [14].$$

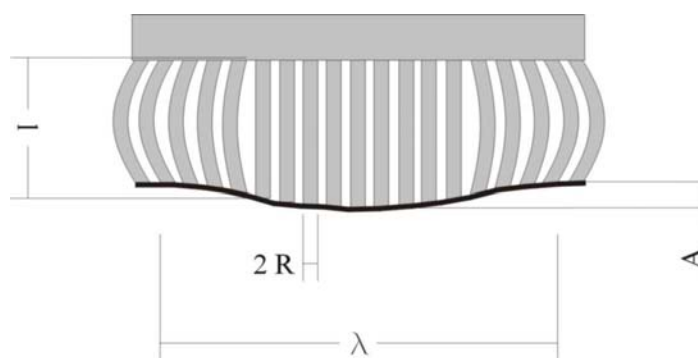


Рис. 3.12. Полный контакт микрощетинки с волнистой поверхностью.

В работе [57] рассмотрен процесс контактирования ворсистого материала с шероховатой поверхностью, высоты вершин шероховатостей которой распределены по нормальному закону, но при этом не учтено сжатие ворсинок вдоль своей оси, а также не учтено влияние сил трения на процесс

контакта. Анализ контактирования многоуровневой структуры волосков (подобной структуре ворсинок геккона) рассмотрен в работах [58, 59].

Рассмотрим контакт ворсистого материала с абсолютно твердой шероховатой поверхностью. Будем считать, что высоты выступов шероховатостей поверхности распределены по нормальному закону. Направим ось z перпендикулярно поверхности (см. рис. 3.13). Пусть $z = 0$ соответствует среднему уровню высот шероховатостей.

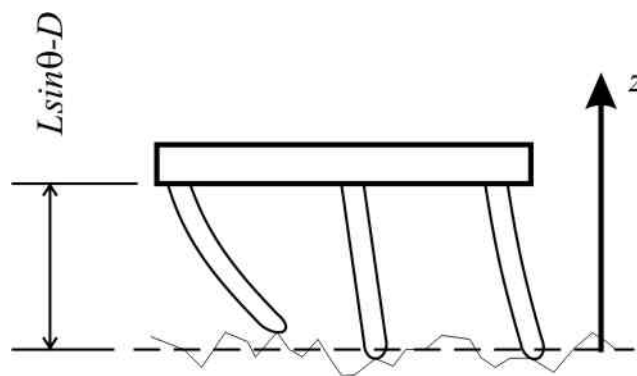


Рис. 3.13. Контакт ворсистого материала с абсолютно твердой шероховатой поверхностью.

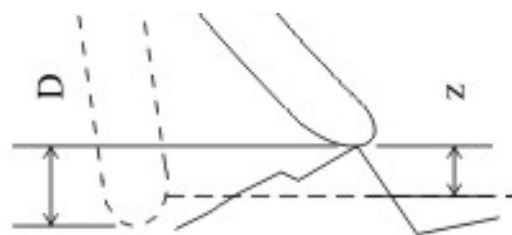


Рис. 3.14. Сжатие ворсинки. Пунктирной линией изображена недеформированная ворсинка, горизонтальная пунктирная прямая обозначает нулевой уровень z .

Расстояние от кончика ворсинки до уровня $z = 0$ обозначим D . Тогда вероятность того, что z попадет в промежуток (D, ∞) равна $\int_D^{\infty} \Phi(z) dz$ где

$\Phi(z) = (M\sqrt{2\pi})^{-1} \exp\left(-\frac{z^2}{2M^2}\right)$ - плотность вероятности для нормального распределения с математическим ожиданием равным нулю и дисперсией $M^2 = \frac{\pi}{2} d^2$ [60]. d - среднее значение абсолютных величин высот шероховатостей поверхности. Величина сжатия ворсинки $\Delta = z - D$ (см. рис.

3.14). Количество контактирующих волосков $N = nS \int_D^{\infty} \Phi(z) dz$ Количество

ворсинок, которые не находятся в непосредственном контакте с поверхностью равно $nS - N = nS \int_{-\infty}^D \Phi(z) dz$. Сила адгезионного притяжения

ворсинки $f_0 = \frac{3}{2} \pi R \sigma_0$ (коэффициент $\frac{3}{2}$ взят для ДКР модели адгезии). Сила,

упругого отталкивания от поверхности, возникающая в материале, сложится из сил упругости, возникающих в контактирующих с поверхностью ворсинках. Средняя сила упругого отталкивания, отнесенная к произведению количества ворсинок на силу адгезии для одной ворсинки:

$$f_1 = \frac{F_{упр}}{nSf_0} = \int_D^{\infty} \frac{E_{eff}}{f_0 n l \sin \theta} (z - D) \Phi(z) dz =$$

$$= \frac{4E_1}{3\sqrt{3}s\sigma_0(\sin^2 \theta + s \cos^2 \theta)} \left[\frac{M}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{D^2}{2M^2}\right) - \frac{D}{2} \left(1 - \operatorname{erf}\left(\frac{D}{\sqrt{2}M}\right)\right) \right]$$

сила адгезионного притяжения материала сложится из сил притяжения контактирующих ворсинок

$$f_2 = \frac{F_{адз}}{nSf_0} = -\int_D^{\infty} \Phi(z) dz = -\frac{1}{2} \left(1 - \operatorname{erf}\left(\frac{D}{\sqrt{2}M}\right)\right).$$

Здесь $erf(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-\xi^2) d\xi$ - функция ошибок. Зависимость

безразмерной разности силы упругого отталкивания и силы адгезии,

$f = \frac{F_{упр} - F_{адг}}{nSf_0}$ от расстояния D и шероховатости d при

$l = 10 \text{ мкм}$, $R = 0.2 \text{ мкм}$, $\theta = 43^\circ$, $\sigma_0 = 0,049 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2}$, $E_1 = 2 \text{ ГПа}$ представлена

на рис. 3.15.

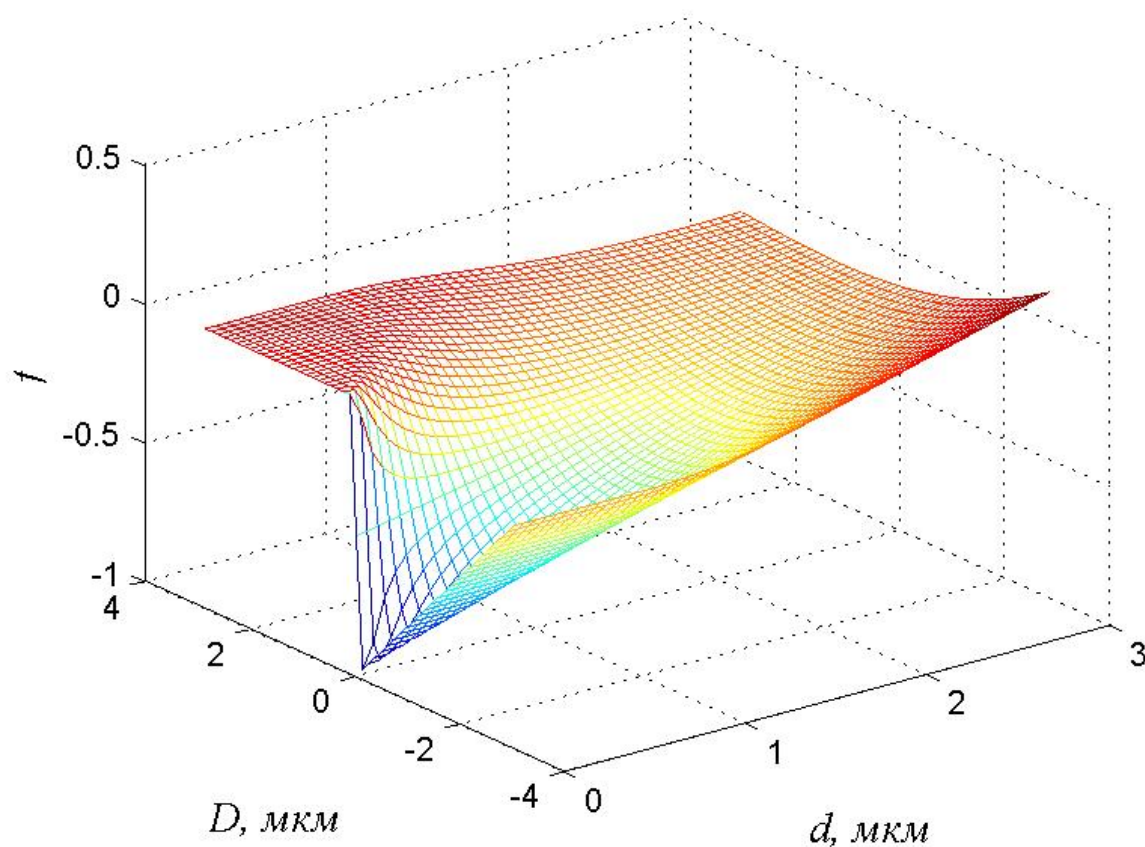


Рис. 3.15 Зависимость безразмерной разности силупругого отталкивания и адгезии от расстояния до поверхности и шероховатости.

Из рисунка видно, что при возрастании величины шероховатости сила адгезионного притяжения к поверхности уменьшается. Данная модель хорошо согласуется с экспериментальными данными, полученными в [33,34].

Чтобы обеспечить адгезионное притяжение материала к шероховатой поверхности, необходимо его предварительно прижать к поверхности с сил, чтобы увеличить число контактирующих ворсинок. При этом сила упругого контактирующих ворсинок $F_{упр}$, которая и равна силе предварительного прижатия. После прижатия можно снять предварительную нагрузку, но материал при этом будет притягиваться с силой Nf_0 . На рис. 3.16 показана зависимость силы адгезионного притяжения материала от силы предварительного прижатия, отнесенных к nSf_0 для разных значений шероховатости поверхности.

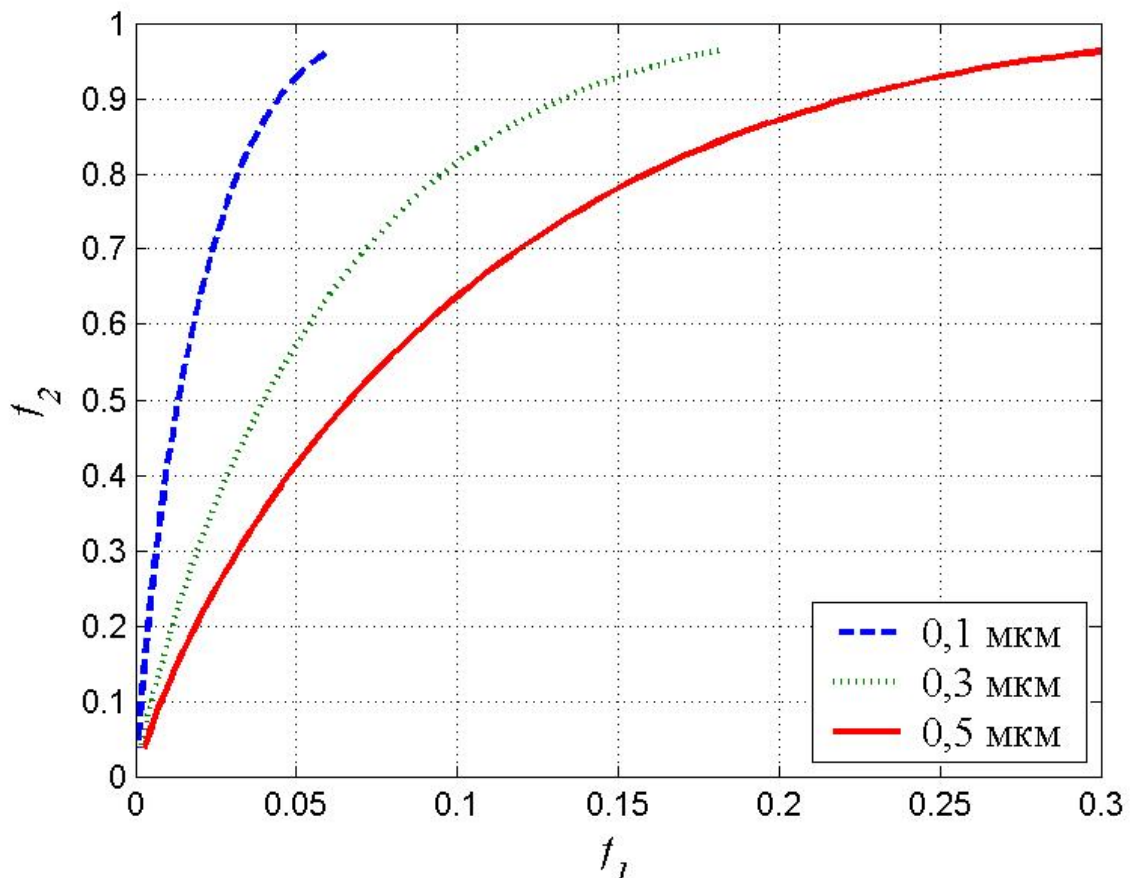


Рис. 3.16. Зависимость силы адгезии от предварительного нагружения.

Рассмотрим случай, когда ворсинки скользят по поверхности. Пусть ворсистый материал прижимается к поверхности с силой F .

При скольжении «по ворсу» выражение для силы, прижимающей адгезив к поверхности, будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} f_{11} &= \frac{F}{nSf_0} = \frac{1}{f_0} \int_D^\infty P_1 \Phi(z) dz = \frac{1}{f_0} \int_D^\infty \frac{(z-D)k_x(\operatorname{tg}^2\theta + 1) - \mu f_0 \operatorname{tg}\theta(s-1)}{\operatorname{tg}^2\theta + (s-1)\mu \operatorname{tg}\theta + s} \Phi(z) dz = \\ &= \frac{k_x(\operatorname{tg}^2\theta + 1)}{f_0(\operatorname{tg}^2\theta + (s-1)\mu \operatorname{tg}\theta + s)} \left[\frac{M}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{D^2}{2M^2}\right) - \frac{D}{2} \left(1 - \operatorname{erf}\left(\frac{D}{\sqrt{2M}}\right)\right) \right] - \\ &- \frac{\mu \operatorname{tg}\theta(s-1)}{2(\operatorname{tg}^2\theta + (s-1)\mu \operatorname{tg}\theta + s)} \left(1 - \operatorname{erf}\left(\frac{D}{\sqrt{2M}}\right)\right) \end{aligned}$$

при скольжении «против ворса»:

$$\begin{aligned} f_{12} &= \frac{F}{nSf_0} = \frac{1}{f_0} \int_D^\infty P_2 \Phi(z) dz = \frac{1}{f_0} \int_D^\infty \frac{(z-D)k_x(\operatorname{tg}^2\theta + 1) + \mu f_0 \operatorname{tg}\theta(s-1)}{\operatorname{tg}^2\theta - (s-1)\mu \operatorname{tg}\theta + s} \Phi(z) dz = \\ &= \frac{k_x(\operatorname{tg}^2\theta + 1)}{f_0(\operatorname{tg}^2\theta - (s-1)\mu \operatorname{tg}\theta + s)} \left[\frac{M}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{D^2}{2M^2}\right) - \frac{D}{2} \left(1 - \operatorname{erf}\left(\frac{D}{\sqrt{2M}}\right)\right) \right] + \\ &+ \frac{\mu \operatorname{tg}\theta(s-1)}{2(\operatorname{tg}^2\theta - (s-1)\mu \operatorname{tg}\theta + s)} \left(1 - \operatorname{erf}\left(\frac{D}{\sqrt{2M}}\right)\right) \end{aligned}$$

выражение для силы адгезии останется без изменений

$$f_2 = \frac{F_{адз}}{nSf_0} = -\int_D^\infty \Phi(z) dz = -\frac{1}{2} \left(1 - \operatorname{erf}\left(\frac{D}{\sqrt{2M}}\right)\right)$$

Сила сухого трения, отнесенная к nSf_0 , при скольжении «по ворсу» равна $f_{mp1} = \mu(f_{11} + f_2)$, а при скольжении «против ворса»

$$f_{mp2} = -\mu(f_{12} + f_2).$$

Зависимость модуля безразмерной силы трения от прижимающей силы, отнесенной к nSf_0 для скольжения «по ворсу» и «против ворса» для следующих значений параметров

$l = 10 \text{ мкм}, R = 0.2 \text{ мкм}, \theta = 43^\circ, \sigma_0 = 0.049 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2}, E_1 = 2 \text{ ГПа}, \mu = 0.3$

показана на рис. 3.17.

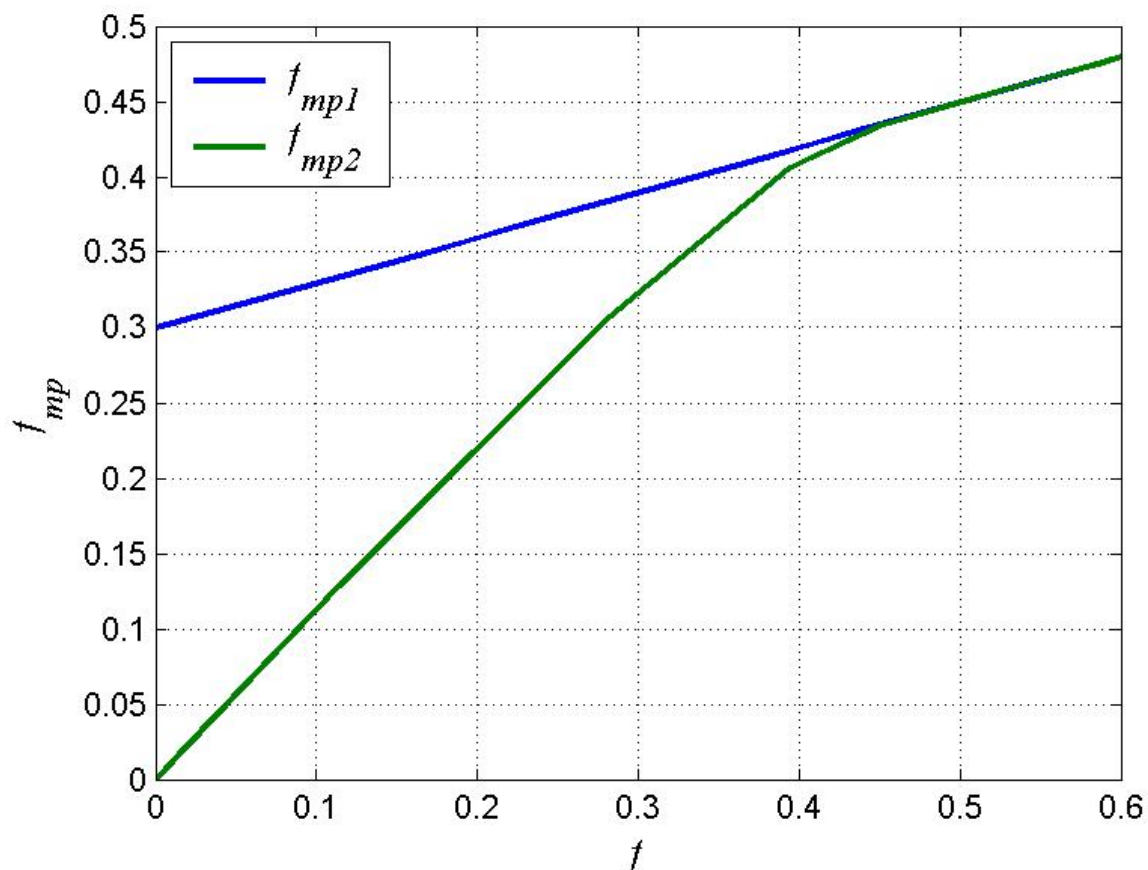


Рис. 3.17. Зависимость безразмерных сил трения при движении в разных направлениях от прижимающей силы.

Из рисунка видно, что при скольжении «по ворсу» модуль силы трения будет выше. Это обусловлено тем, что в этом направлении адгезив более податлив, значит при той же прижимающей силе количество контактирующих волосков, влияющее на величину трения, будет больше. При увеличении прижимающей силы, силы трения сравниваются и будут равны μf по абсолютной величине.

Условие неслипания ворсинок

Чем выше плотность упаковки ворсинок, тем большее их количество контактирует с поверхностью, соответственно больше сила их адгезионного притяжения к поверхности. Но при слишком малом расстоянии между ворсинками, между ними начинают действовать силы Ван-дер-Ваальса и происходит их слипание, что приводит к уменьшению силы сцепления с поверхностью. Чтобы избежать слипания, ворсинки должны быть достаточно жесткими при изгибе и находиться на достаточном удалении друг от друга.

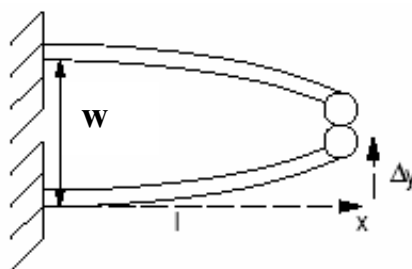


Рис. 3.18 Слипание ворсинок.

Сила адгезионного притяжения между соседними волосками имеет величину порядка 200 нН, $f_0 \leq \frac{F_y}{2}$. В работе [43] получено ограничение на минимальное расстояние между ворсинками, которое обеспечивает их неслипание.

$$w \geq \frac{8f_0 l^3}{3\pi R^4 E_1}, \quad l - \text{длина ворсинки, } R - \text{радиус закругления ее кончика,}$$

E_1 - модуль Юнга материала ворсинки (~ 4 ГПа для кератина). При длине ворсинки $l > 9R$ получается, что $w > 2R$.

4. ПРИМЕНЕНИЕ СУХИХ АДГЕЗИВОВ В УСТРОЙСТВАХ СЦЕПЛЕНИЯ С ПОВЕРХНОСТЬЮ.

4.1. Основные характеристики устройств сцепления на основе адгезионных материалов.

Очень заманчиво использование в робототехнике устройств сцепления с поверхностью на основе адгезионных материалов. Такое устройство достаточно придавить к поверхности для обеспечения сцепления с ней. Отрыв же от поверхности может происходить постепенно, наподобие развития межфазной трещины, что обеспечит довольно малое усилие отрыва.

Сухой адгезионный материал в качестве покрытия контактной поверхности робота расширяет его функциональные возможности, улучшает технические параметры. Повышается мобильность робота, он становится способным двигаться по произвольно ориентированным в пространстве поверхностям, переходить с поверхности на поверхность. Существенно упрощается конструкция, а соответственно и вес робота по сравнению, например, с роботами, имеющими вакуумные присоски.

К устройству сцепления с поверхностью предъявляются следующие требования:

Структура материала контактных поверхностей устройства должна быть такой, чтобы максимизировать площадь соприкосновения с поверхностью.

Устройство должно обеспечивать предварительный прижим адгезионного материала к поверхности для надежного прикрепления робота.

Отрыв от поверхности должен происходить постепенно, а не сразу по всей контактной поверхности.

На рис. 4.1 и рис. 4.2 представлены наиболее простые конструктивные исполнения роботов, использующих адгезионные материалы для сцепления с поверхностью.

Конструкция, представленная на рис. 4.1 состоит из несущей рамы 1, на которой крепятся два мотора 2. На валы моторов насаживаются колеса 3, имеющие радиальные выступы, на торцах которых крепится упругая пластина 4, к которой приклеивается адгезионный материал 5. Предварительное прижатие адгезива обеспечивается за счет момента M , создаваемого мотором. Постепенный же отрыв за счет упругих пластин, к которым приклеен адгезив.

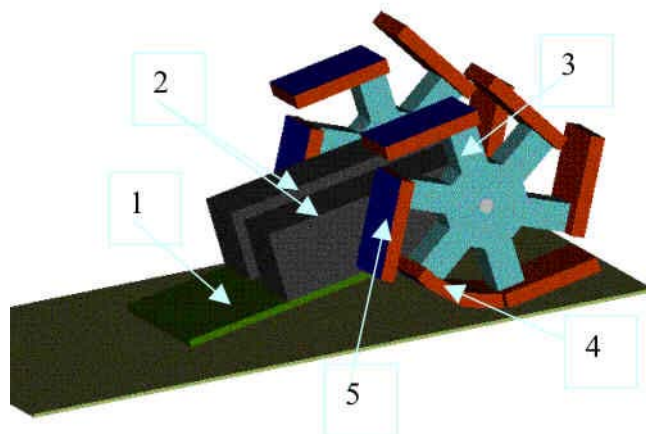


Рис. 4.1. Пример исполнения робота с адгезионным схватом.

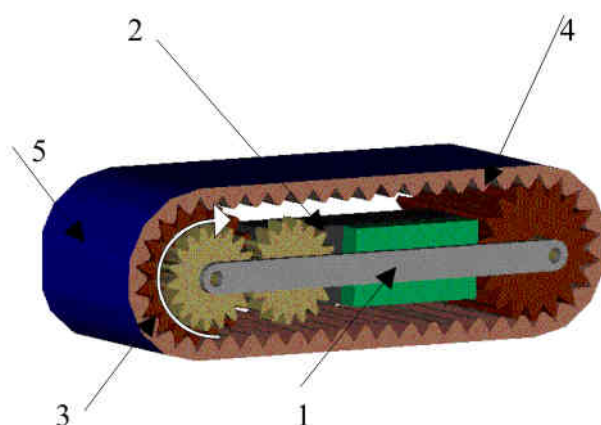


Рис. 4.2.

На Рис. 4.2 представлена конструкция гусеничного робота. Электродвигатель 2 прикреплен к раме 1. На ось двигателя насажена шестерня, которая вращает шестерню, жестко скрепленную с ведущим колесом 3 (стрелкой показано направление вращения), которое в свою очередь вращает гусеницу 4. На внешнюю сторону гусеницы приклеен адгезионный материал 5.

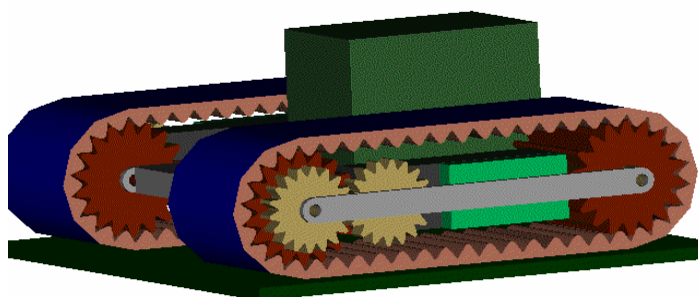


Рис. 4.3

Постепенный отрыв осуществляется вращением гусеницы вокруг ведущего колеса при движении. Чтобы у такого робота была возможность поворачивать на плоскости, необходимо снабдить его второй подобной гусеницей (см. рис. 4.3). При этом на платформу между гусеницами можно будет установить дополнительное оборудование.

Рассмотренные конструкции роботов могут обеспечить движение как по плоской поверхности, произвольно ориентированной в пространстве, так и переход с поверхности на поверхность. При переходе с поверхности на поверхность, первая конструкция обеспечивает большую площадь соприкосновения, чем при движении по плоскости при углах между поверхностями менее 180 градусов. Площадь соприкосновения для второй конструкции при переходе с поверхности на поверхность уменьшается, контактируют только два сравнительно небольших сегмента гусеницы. Таким образом, первая конструкция оказывается более мобильной, но при

этом страдает грузоподъемность, так как площадь соприкосновения с поверхностью мала по сравнению со второй конструкцией. Преимущество же второй конструкции в большей грузоподъемности за счет большей площади соприкосновения, а соответственно и силы адгезионного притяжения. Похожие конструкции роботов были предложены в [61]. В этих конструкциях для предварительного прижатия адгезива используется так называемый «хвост». Такое решение не позволяет регулировать силу придавливания адгезива к поверхности, поэтому в качестве устройства, создающего, момент, необходимый для прижатия, предлагается использовать электродвигатель.

Рассмотрим процесс отрыва адгезионного материала от поверхности. Будем считать, что адгезионный материал отрывается постепенно посредством момента M . Отрываемый слой будем рассматривать как упругую пластину, один из краев которой заделан. Ось x направим вдоль поверхности, ось ζ перпендикулярно ей (см. Рис. 4.4). Уравнение изогнутой оси пластины имеет вид [62]

$$M = \frac{Eb^3l_w}{12(1-\nu^2)} \frac{d^2\zeta}{dx^2}, \quad (4.1)$$

где b - толщина, l_w - ширина пластины; ν - коэффициент Пуассона, E - модуль Юнга материала пластины. Работа, производимая этим моментом при удлинении области отрыва на dx , расходуется на изменение упругой энергии пластины U_E и на работу, требуемую для отрыва площадки $l_w dx$, равную A_S :

$$Md\alpha = U_E + A_S.$$

При удлинении области отрыва на dx угол отклонения пластины изменится на $d\alpha = \frac{d\zeta}{dx}$. Из (4.1), получим:

$$Md\alpha = Md\left(\frac{d\zeta}{dx}\right) = \frac{Eb^3l_w}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{d^2\zeta}{dx^2}\right)^2 dx.$$

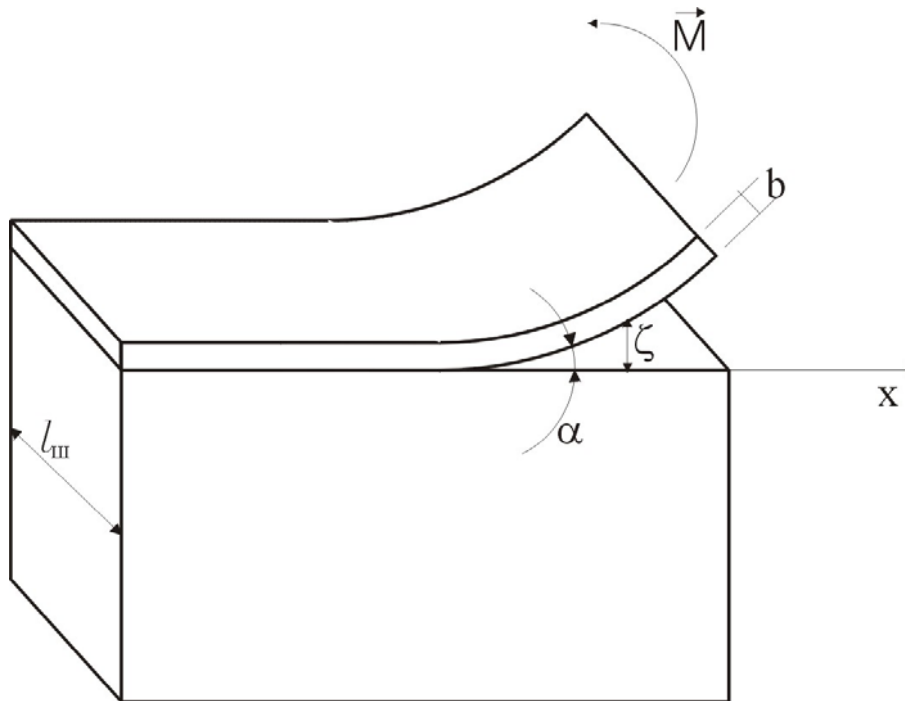


Рис. 4.4. Отрыв упругого слоя от поверхности.

Изменение упругой энергии отрываемой пластины определится выражением [62]

$$\frac{Eb^3l_{III}}{24(1-\nu^2)} \left(\frac{d^2\zeta}{dx^2} \right)^2 dx = \frac{Md\alpha}{2},$$

то есть равно половине затраченной работы, значит, вторая половина работы пойдет на изменение поверхностной энергии.

Предположим, что адгезионный материал имеет ворсистую структуру.

Каждая ворсинка притягивается к поверхности с силой [63] $f = \frac{AR}{6D^2}$, где A

- константа Гамакера, D - расстояние от кончика ворсинки до поверхности, R

- радиус ворсинки. Для отрыва ворсинки от поверхности необходимо

затратить работу, равную $\int_{D_0}^{\infty} f dy = \frac{AR}{6D_0}$, где D_0 - межатомное расстояние

($D = D_0 \approx 0.165 \text{ нм}$ при контактировании ворсинки с поверхностью). Для отрыва площади $l_u dx$ необходимо затратить работу

$$A_S = \frac{AR}{6D_0} n l_u dx = \frac{F}{S} D_0 l_u dx,$$

где n - количество ворсинок на единицу площади, F - сила адгезионного притяжения пластины площади S , к поверхности.

Получим:

$$\frac{M}{2} \frac{d^2 \zeta}{dx^2} dx = \frac{F}{S} D_0 l_u dx,$$

откуда момент, необходимый для постепенного отрыва пластины от подложки

$$M = l_u \sqrt{\frac{Eb^3 FD_0}{6S(1-\nu^2)}}.$$

4.2. Повышение анизотропности трения при использовании адгезионных материалов.

При использовании сухого адгезионного материала на контактных поверхностях внутритрубного электромагнитного миниробота, рассмотренного в главе 2 можно увеличить анизотропность трения его упоров. Увеличение анизотропности трения необходимо для повышения грузоподъемности робота. Повысить анизотропность трения можно, снабдив контактные поверхности упоров робота накладками, изготовленными из адгезионного материала (см. рис. 4.5). Накладки должны представлять собой наноструктурированный материал, наклеенный на упругоподатливую подложку, которая в свою очередь наклеена на контактную поверхность робота. Упругоподатливая подложка предназначена для того, чтобы адгезионный наноструктурированный материал плотно прилегал к поверхности трубы с учетом ее макро неровностей.

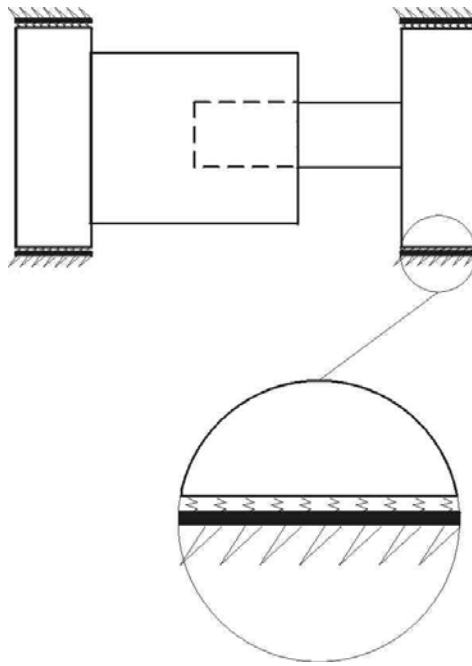


Рис. 4.5. Схематическое изображение наноструктурированного устройства сцепления с поверхностью внутритрубного минибота.

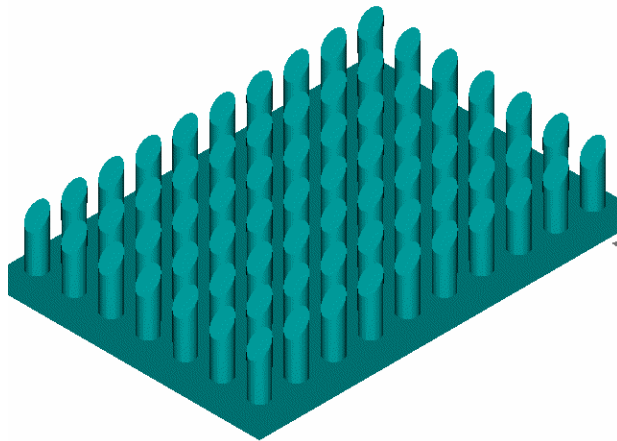


Рис. 4.6. Структура сухого адгезионного материала с анизотропным трением.

На рис. 4.6 показана структура такого адгезионного материала с анизотропным трением. На полиамидной подложке вытравлены ворсинки со

срезанной под определенным углом вершиной на срезе в свою очередь выращены еще более мелкие волоски. Диаметр ворсинок порядка десятков микрометров, диаметр волосков порядка долей микрометра. На рис. 4.7 показано поведение ворсинок при отсутствии нагрузки, а также при скольжении вперед и назад.

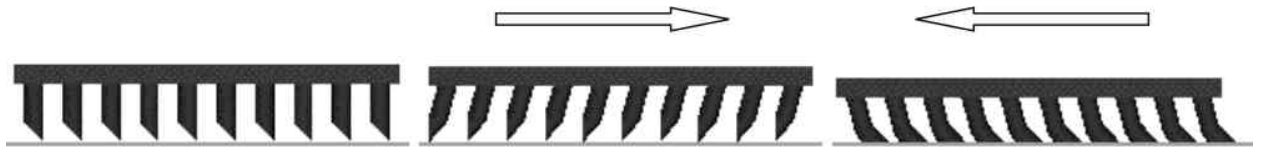


Рис. 4.7. Деформирование волосков при движении.

**ненагруженное состояние (слева), движение вперед (в середине),
движение назад (справа).**

Во время скольжения вперед ворсинки изгибаются таким образом, что площадь соприкосновения с поверхностью минимальна. При движении в обратном направлении с поверхностью будут контактировать волоски, находящиеся на срезе ворсинок, возникнет адгезионное притяжение, следовательно увеличится сила трения скольжения.

При скольжении вперед выражение для силы трения будет таким же как в случае для скольжения упругих ворсинок по ворсу, рассмотренном в главе 2

$$F_1 = \frac{k_x \Delta(1 + \operatorname{tg}^2 \theta) \mu}{\operatorname{tg}^2 \theta + \mu(s-1) \operatorname{tg} \theta + s}$$

При скольжении назад ворсинка изгибается на некоторый угол, если срезать концы ворсинок под этим углом и расположить на них микроволоски, то при скольжении назад они придут в соприкосновение с поверхностью, и

увеличится результирующая сила трения $F_2' = \mu(P_2' + F_{адз})$. Сила трения при этом будет иметь величину

$$F_2' = \frac{k_x(\Delta + \Delta_0)(1 + \operatorname{tg}^2 \theta)\mu}{\operatorname{tg}^2 \theta - \mu(s-1)\operatorname{tg} \theta + s},$$

$$\text{где } \Delta_0 = \mu F_{адз} \cos \theta \sin \theta \left(\frac{s-1}{s} \right)$$

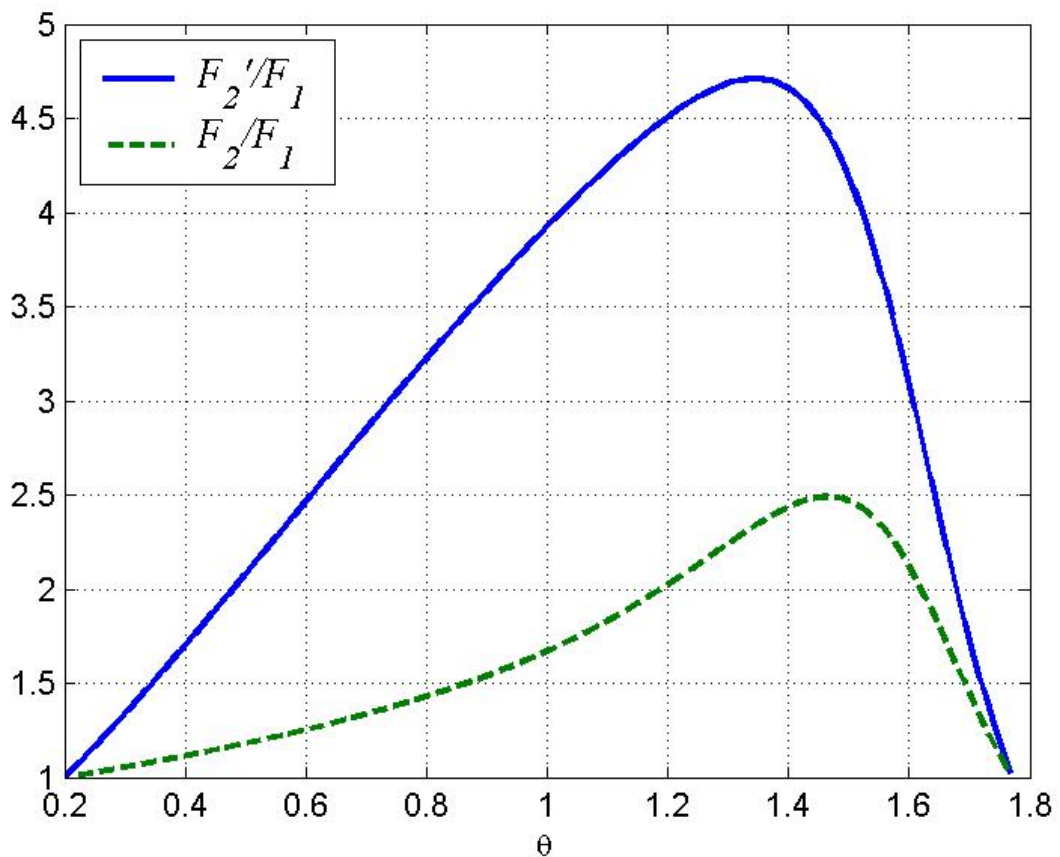


Рис. 4.8. Зависимость отношения сил трения от угла наклона ворсинок.

Отношение сил трения при скольжении против ворса

$$\frac{F_2'}{F_1} = \left(1 + \frac{\Delta_0}{\Delta} \right) \frac{\operatorname{tg}^2 \theta + \mu(s-1)\operatorname{tg} \theta + s}{\operatorname{tg}^2 \theta - \mu(s-1)\operatorname{tg} \theta + s}.$$

Зависимость $\frac{F_2'}{F_1}$ от θ $\mu=0.3, s=10$, и $F_{a0z}=10H$ показана на рис. 4.8

Угол, под которым срезаны ворсинки, должен быть равен $\theta - \alpha$, где α - угол на который отклоняются ворсинки при движении назад. Величина этого угла может быть определена по формуле [64]:

$$tg\alpha = \frac{2P_y l^2}{\pi E_1 R^4} = \frac{3s\epsilon tg\theta(1 - \mu tg\theta)}{2(tg^2\theta - (s-1)\mu tg\theta + s)}$$

Зависимость $tg\alpha$ от θ для значений $\mu = 0.3, \epsilon = 0.05$ показана на рис. 4.9.

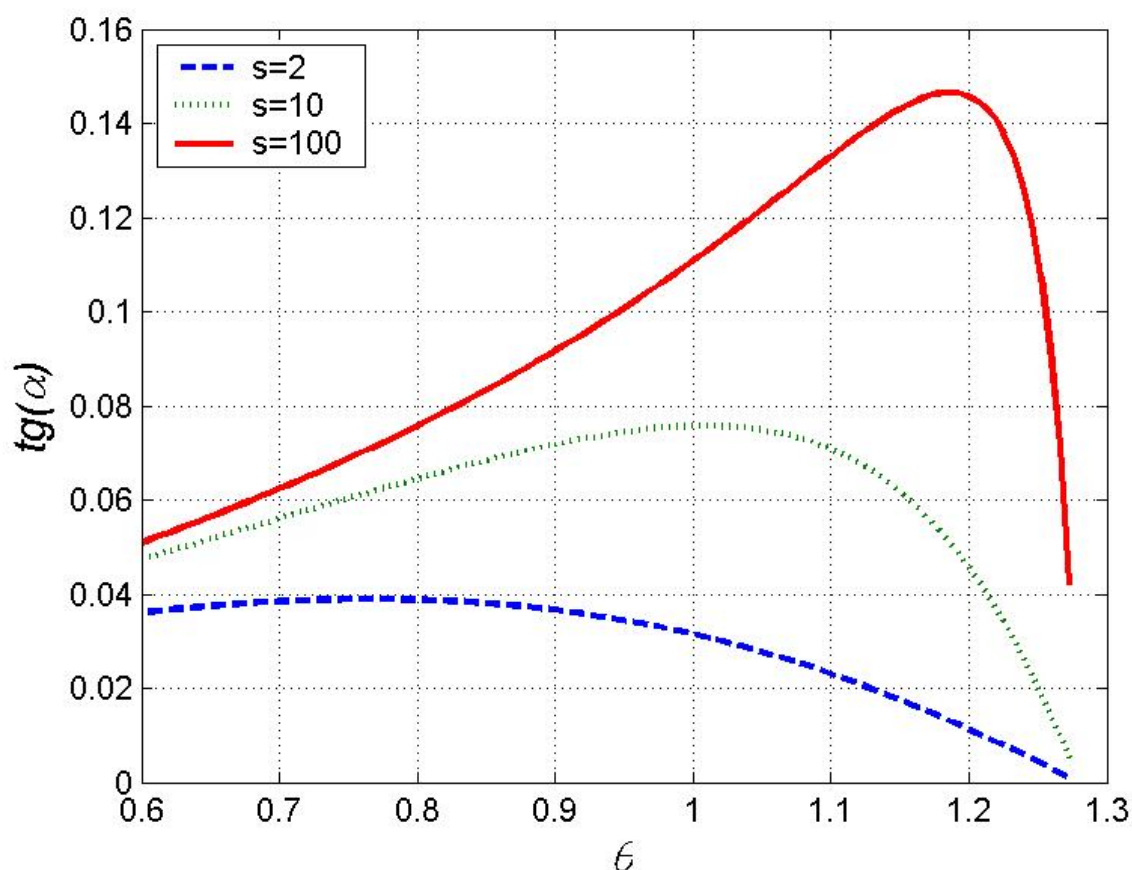


Рис. 4.9 Зависимость угла α от ориентации ворсинок.

4.3. Технические требования к сухим адгезионным материалам для покрытия контактных поверхностей роботов.

На основе вышеизложенной модели ворсистого адгезионного схвата были разработаны технические требования к адгезионному материалу двух типов. Первый тип – это материал на основе упругого полимера, имеющий двухуровневую структуру волосков. Возможное исполнение материала показано на рис. 4.10. На подложке под углом выращиваются столбики из того же материала, на которых в свою очередь выращиваются более узкие столбики. Ориентировочные размеры приведены на рис. 4.11. Примерные технические требования, предъявляемые к полимеру приведены в табл. 4.1. Возможный материал, из которого изготавливается структура – полиимид.

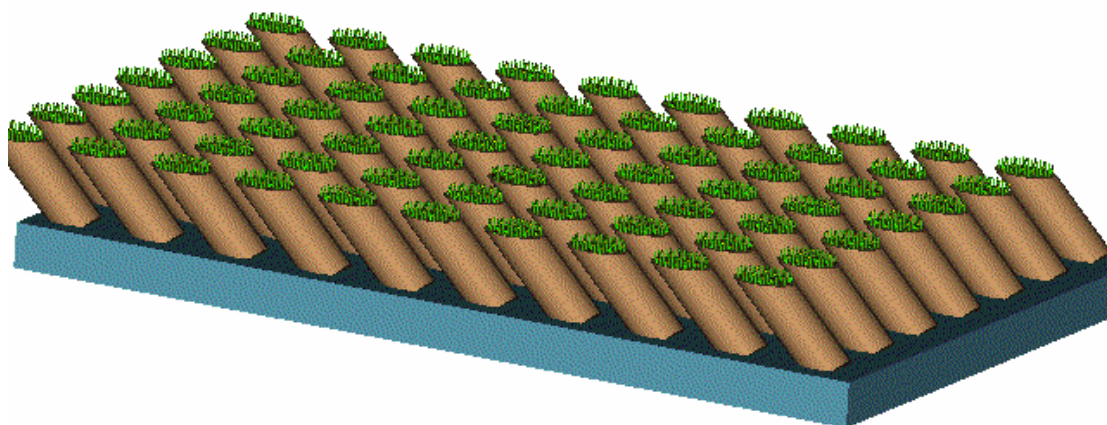


Рис. 4.10. Структурированный материал на основе упругого полимера.

На рис. 4.12 представлены размеры ворсинок для материала, который должен обладать большой анизотропией по трению при движении «по ворсу» и «против ворса».

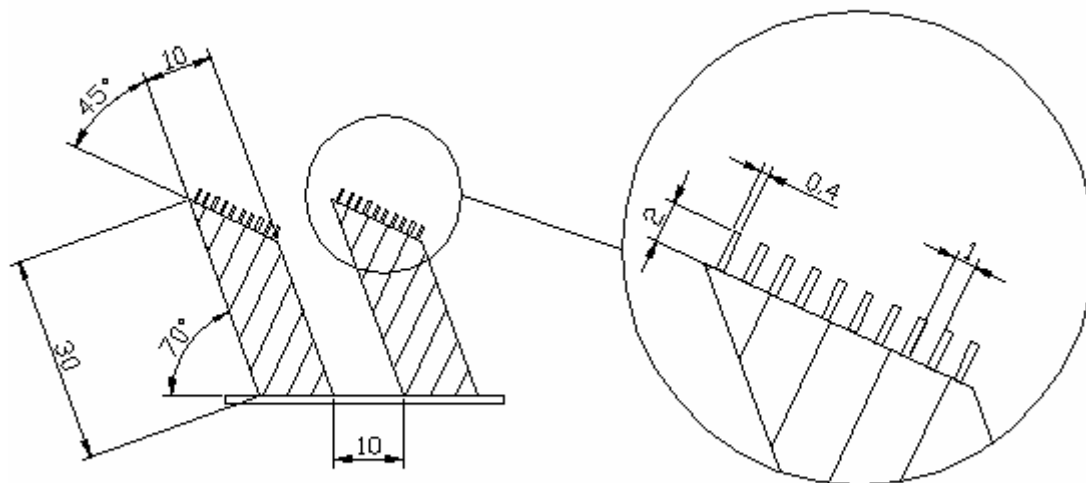


Рис. 4.11. Размеры ворсинок, составляющих структуру материала (размеры приведены в микрометрах).

Табл. 4.1. Технические характеристики материала на основе упругого полимера.

Показатель	Значение
Плотность, г/см ³	0,9-1,3
Предел прочности при растяжении, МПа	110-120
Свободная поверхностная энергия, мДж/м ²	50-60
Модуль Юнга, Па	$1 \cdot 10^9 - 5 \cdot 10^9$
Коэффициент термического расширения, 1/К	$8-12 \cdot 10^{-5}$

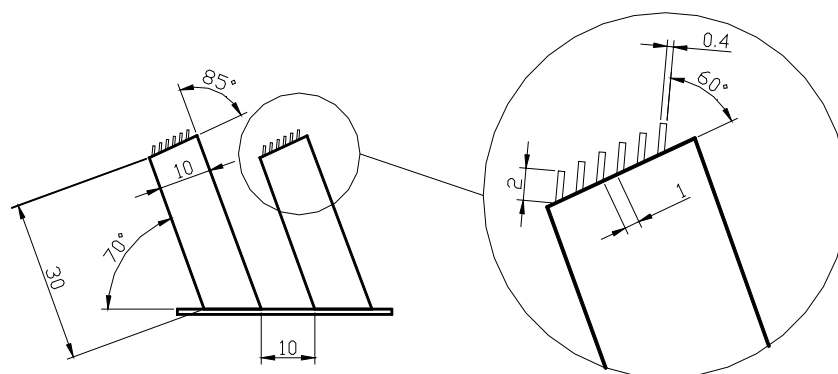


Рис. 4.12. Размеры ворсинок для материала с повышенной анизотропией по трению (размеры приведены в микрометрах).

Второй тип – материал на основе эластомера (например полидиметилсилоксан). В этом случае нет необходимости выращивать ворсинки на скошенной поверхности столбиков, т. к. по значению модуля Юнга эластомеры относятся к липким материалам. Возможное исполнение материала показано на рис. 4.13. На подложке под углом выращиваются столбики из того же материала. Ориентировочные размеры столбиков приведены на рис. 4.14. Примерные технические требования, предъявляемые к материалу представлены в табл. 4.2.

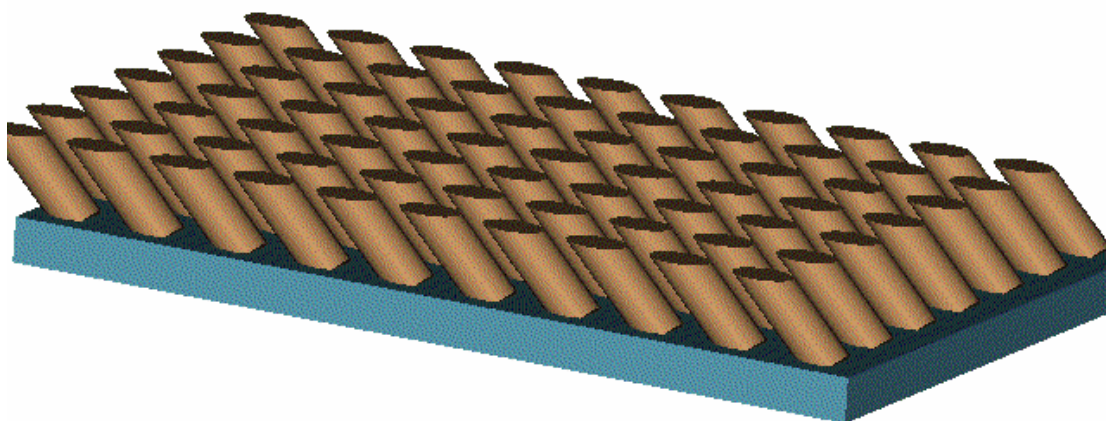


Рис. 4.13. Структурированный материал на основе эластомера.

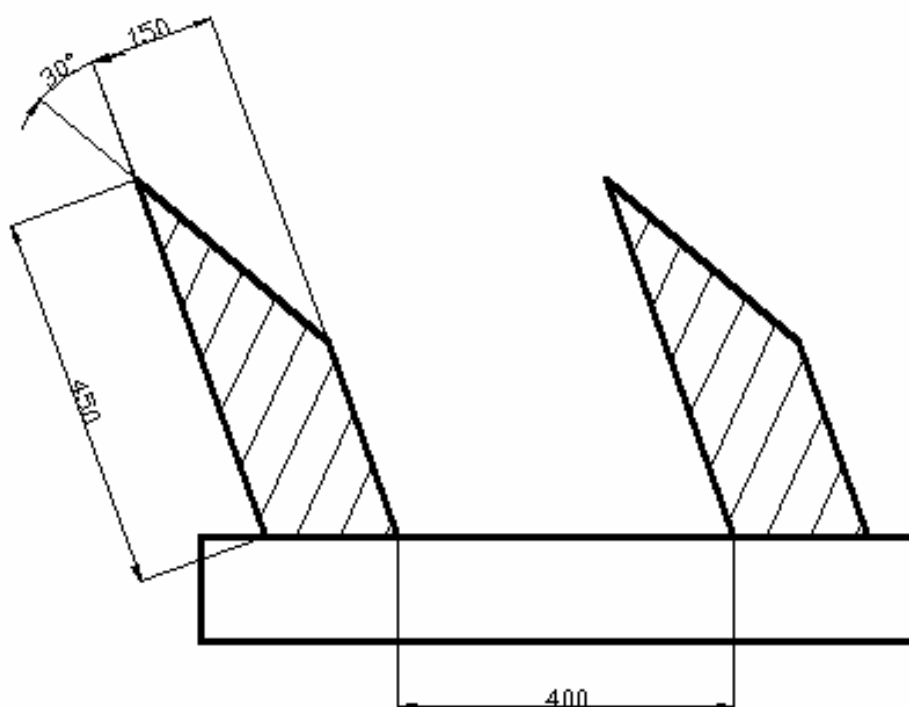


Рис. 4.14. Размеры ворсинок, составляющих структуру материала (размеры приведены в микрометрах).

Табл. 4.2. Технические характеристики материала на основе эластомера.

Показатель	Значение
Плотность, г/см ³	1-1,6
Предел прочности при растяжении, МПа	5-15
Свободная поверхностная энергия, мДж/м ²	20-30
Модуль Юнга, Па	$5 \cdot 10^4 - 6 \cdot 10^5$
Коэффициент термического расширения, 1/К	$10 - 50 \cdot 10^{-5}$

В случае, когда требуется повышение анизотропии по трению, размеры и наклон ворсинок показаны на рис. 4.15.

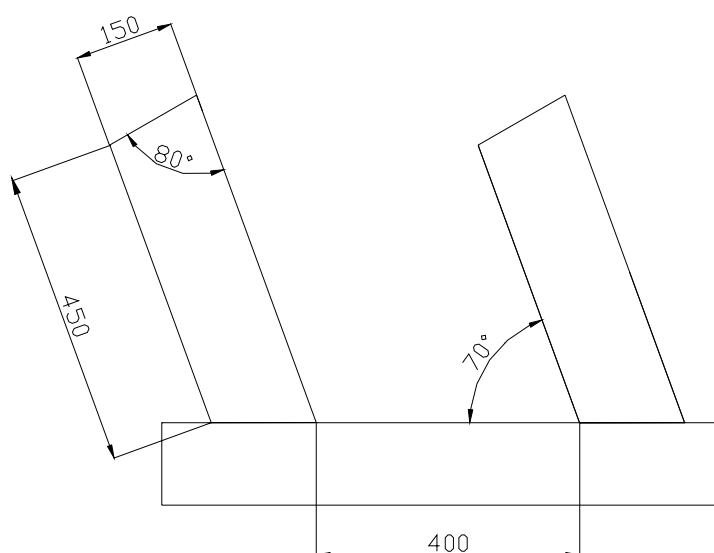


Рис. 4.15. Размеры ворсинок для материала, обладающего повышенной анизотропией на основе эластомера (размеры приведены в микрометрах).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работы над диссертацией можно сформулировать следующие выводы.

1. В результате проведенного моделирования динамики внутритрубного робота с электромагнитным приводом показано, что при неизменной конструкции робота изменением частоты и длительности управляющих воздействий можно увеличить скорость движения робота, обеспечив ему при этом достаточную длину хода штока. Для увеличения грузоподъемности можно применить более совершенные материалы упоров в целях обеспечения максимальной анизотропии по трению.

2. Разработана математическая модель движения электромагнитного робота. В результате проведенного математического моделирования взаимодействия адгезионного ворсистого материала с шероховатой поверхностью, выявлены основные преимущества такого материала для применения в устройствах сцепления роботов с поверхностью.

3. На основе исследования явления анизотропии по трению ворсистого материала получены аналитические выражения для сил трения при скольжении вдоль наклона ворсинок и против него.

4. Создано программное обеспечение, моделирующее динамику движения робота. Проведено сравнение данных, полученных при моделировании, с экспериментальными, при этом погрешность не превышает 6-7 %.

5. На основе данных, полученных при моделировании, осуществлена модернизация внутритрубного миниробота с целью улучшения его динамических характеристик. Создан внутритрубный электромагнитный робот с возможностью реверсивного движения, которое осуществляется за счет изменения угла наклона упоров.

6. Проведены экспериментальные исследования по измерению динамических характеристик робота, обосновывающие достоверность результатов моделирования.

7. На основе проведенных исследований разработаны технические требования к материалу, необходимому для изготовления устройств сцепления с поверхностью.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

- 1. Чашухин В.Г. Моделирование динамики и определение управляющих параметров внутритрубного минибота. // Теория и системы управления, 2008, № 5, с. 142-147.**
- 2. В.Г. Градецкий, В.Г. Чашухин, О. Н. Каменева Анализ параметров движения миниатюрных многозвенных роботов с электромагнитными двигателями // Нано- и микросистемная техника, 2007 №11 с. 58-65.**
3. Veshnikov V., Gradetsky V., Chaschuhin V. Simulation of the mobile multilink robot with vision virtual reality system. // Proceedings of the VR – Mech'01, Brussels, Belgium, November 22-24, 2001.
4. Veshnikov V., Gradetsky V., Chaschuhin V. Computer modeling of the crawling robot motion inside a pipeline. // Proceedings of the 4-th International Workshop on Computer Science and Information Technologies CSIT – 02, Patras, Greece, September 18-20, 2002.
5. Chaschuhin V. Mechanics of the adaptive biorheological gripper based on mechanism of adhesion in Gecko. // Proceedings of the IARP Workshop on Adaptive and Intelligent Robots: Present and Future. November 24-26, 2005. Moscow. Russia.
6. Chaschuhin V., Gradetsky V. Analysis of the interaction nanomechanism of the gecko mimicking material with the surface microstructure. // Proceedings of IARP Micro and Nano Robotics, Paris, France, October 23-24, 2006.

7. Gradetsky V., Knyazkov M., Chaschuhin V., Kameneva O. Micro- and nanotechnologies in robotics. // Proceedings of The international Workshop on Micro- and Nano Production Technologies and Systems, Moscow, Russia, October, 17-18, 2007.
8. Чащухин В.Г. Исследование устройств сцепления мобильных роботов с поверхностью, имеющих адгезионные материалы на контактных площадках. // Препринт № 861 ИПМех РАН.
9. Gradetsky V., Knyazkov M., Chaschuhin V. Coupling devices interaction with surfaces in the process of miniature mobile robot's motion. // Proceedings of the ICMEN 2008, Kassandra-Chalkidiki, Greece, October, 1-3, 2008.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болотник Н. Н., Костин Г. В., Черноусько Ф. Л. Движение шагающего аппарата в тороидальной трубе // Изв. РАН. Механика твердого тела, 1998, № 4, с. 86-101
2. Fearing R. S., Sahai R., Hoover A. Rapidly Prototyping Millirobots using Toolkits and Microassembly // Proceedings of the IARP 2006, Paris, France, October 23-24, 2006.
3. Oya T., Okada T. Development of a steerable, wheel-type, in-pipe robot and its path planning // Advanced Robotics, 2005, Vol. 19, № 6, pp. 635-650
4. Komori M., Suyama K. Inspection robots for gas pipelines of Tokyo Gas // Proceedings of the conference Advanced Robotics, 2001, Vol. 15, № 3, pp. 365-370.
5. В. Г. Градецкий, В. Б. Вешников, С. В. Калиниченко, Л. Н. Кравчук «Управляемое движение мобильных роботов по произвольно ориентированным в пространстве поверхностям» М.: Наука, 2001 г., с. 26-91, 275-294.
6. DOMENICO LONGO AND GIOVANNI MUSCATO “The Alicia3 Climbing Robot A Three-Module Robot for Automatic Wall Inspection” // IEEE Robotics & Automation Magazine, MARCH 2006, 1070-9932, pp. 2-10.
7. <http://www.uralbc.ru/climber/robot.htm>
8. Moghaddam M., Hadi A. Control and Guidance of a Pipe Inspection Crawler (PIC) // Proceedings of 22nd International Symposium on Automation and Robotics in Construction ISARC 2005, Ferrara, Italy
9. Добролюбов А.И. Бегущие волны деформации//Минск: Наука и техника.1987. 144с.

-
10. Добролюбов А.И. О механике движения сухопутной змеи // Биофизика. –1983.–№2.–С.330-335
 11. Черноусько Ф. Л., Движение многозвенника по горизонтальной плоскости // Прикладная математика и механика, Т. 64, вып. 1, 2000, с. 8-18
 12. Черноусько Ф. Л. Управляемые движения двузвенника по горизонтальной плоскости.
 13. Черноусько Ф. Л. Волнообразные движения многозвенника по горизонтальной плоскости. // Прикладная математика и механика, Т. 64, вып. 4, 2000, с. 518-531
 14. Veshnikov V., Gradetsky V., Chaschuhin V. Computer modeling of the crawling robot motion inside a pipeline. // Proceedings of the 4-th International Workshop on Computer Science and Information Technologies CSIT – 02, Patras, Greece, September 18-20, 2002.
 15. Suzumori K., Wakimoto S., Takata M. A Miniature inspection robot negotiating pipes of widely varying diameter // Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics & Automation Taipei, Taiwan, 2003, pp. 2735-2740
 16. А.А.Иванов. Волновое движение и бесколесный движитель змеевидного: теория и действующий макет// Конференция "Адаптивные роботы и интеллектуальные роботы: современное состояние и перспективы". Доклады, т.2. М.,2005, сс.65-71
 - 17 Черноусько Ф. Л. Анализ и оптимизация движения тела, управляемого посредством подвижной внутренней массы // Прикладная математика и механика. 2006, т. 70, вып. 6.
 18. Wang Z., Appleton E. The concept and research of a pipe crawling rescue robot // Advanced Robotics, 2003, Vol. 17, No 4, pp. 339-358

19. Unver O., Murphy M., Sitti M. Geckobot and Waalbot: Small-Scale Wall Climbing Robots. // AIAA 5th Aviation, Technology, Integration, and Operations Conference (ATIO). Arlington. Virginia. 2005.

20. Menon C., Murphy M., Shah G., Sitti M., Angrilli F. WaalBots for Space Applications. // 55th IAC Conference , Vancouver, 2004.

21. Sitti M., Fearing R. S. Synthetic gecko foot-hair micro/nano-structures for future wall-climbing robots. // Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Taipei. Taiwan. 2003.

22. Gradetsky V., Solovtsov V., Kniazkov M., Rizzotto G., Amato P. Modular design of electro-magnetic mechatronic microrobots // Proceedings of the 6-th International Conference CLAWAR 2003, Catania, Italy, 2003, pp. 651-658

23. Rizzoto G., Velkenko M., Amato P., Gradetsky V., Baskirov S, Knyazkov M., Solovtov V. In-Pipe Microrobot with Inertial Mood of Motion // Climbing and Walking Robots, Springer Berlin Heidelberg, 2005, pp. 1041-1051

24. Antheierens C., Betemps M. Design and control of a pneumatic microrobot for in-pipe inspection of nuclear pipes // Journal of Mechatronics, 2001, Vol. 1, № 2, pp. 155-174

25. Sun L., Lu L., Qin X., Gong Z. Micro robot for detecting wall cracks of pipe // Proceedings of the 6-th International Conference CLAWAR 2003, Catania, Italy, 2003, pp. 643-650

26. Dovica M., Gorzas M. Mechatronics aspects of in-pipe minimachine on screw-nut principle design // Recent Advances in Mechatronics, Berlin, Springer Berlin Heidelberg, 2007, pp. 335-339

27. Нейман Л. Р., Демирчян К. С. Теоретические основы электротехники. Т. 1. – Л.: Энергия, Ленингр. отд-ие, 1967. – 522с.

28. Huajian Gao, Haimin Yao. Shape insensitive optimal adhesion of nanoscale fibrillar structures. // PNAS. 2004. V. 101. № 21. 7851-7856.

-
29. Arzt E., Gorb S., Spolenak R. From micro to nano contacts in biological attachment devices. // *Proceedings of the National Academy of Science*. 2003. V. 100. № 19. P. 10603 – 10606.
30. Aristotle. *Historia Animalium*. Book IX (trans. Thompson D. A. W.) 1918. Clarendon. Oxford. (http://classics.mit.edu/Aristotle/history_anim.html).
31. Duncan J. Irschick, Christopher C. Austin, Ken Petren, Robert N. Fisher, Jonatan B. Losos, Olaf Ellers. A comparative analysis of clinging ability among pad-bearing lizards. // *Biological Journal of the Linnean Society*. 1996. № 59. 21-35.
32. Autumn K., Sitti M., Liang A. Y., Peattie M. A., Hansen W. R., Sponberg S., Kenny T. W., Fearing R., N. Israelachvili, Full R. J. Evidence for van der Waals adhesion in gecko setae. // *PNAS*. 2002. V. 99. № 19. 12252-12256.
33. Autumn K., Peattie M. A. Mechanisms of adhesion in geckos. // *Integr. Comp. Biol*. 2002. № 42. 1081-1090.
34. Autumn K., Liang Y., Hsieh T. et al. Adhesive force of a single gecko foot hair. // *Nature*. 2000. V. 405. 681-685.
35. Israelachvili J. *Intermolecular and surface forces*. 2nd ed. // Academic Press. London. 1992
36. Autumn K., Hsieh S. T., Dudek D. M., Chen J., Chitaphan C., Full R. J. Dynamics of geckos running vertically. // *The Journal of Experimental Biology* 2006. № 209. P. 260-272.
37. Hansen W. R., Autumn K. Evidence for self-cleaning in gecko setae. // *National Academy of Science*. 2005. V. 102. № 2. 385-389.
38. Neinhuis C., Barthlott W. Characterization and distribution of water-repellent, self-cleaning plant surfaces // *Ann. Bot.* 1997. V. 79. 667-677.

-
39. Кинлок Э. Адгезия и адгезивы: наука технология. Пер. с англ. М.: Мир. 1991. 484 с.
40. Qurere P., Lafuma A., Bico J. Slippery and sticky micro-textured solids. // *Nanotechnology*. 2003. V. 14. P. 1109-1112.
41. Autumn K., Hansen W. Ultrahydrophobicity indicates a non-adhesive default state in gecko setae. // *J Comp Physiol A*
42. Geim A. K., Dubonos S. V., Grigorieva I. V., Novoselov K. S., Zhukov A. A., Shapoval S. Yu. Microfabricated adhesive mimicking gecko foot-hair. // *Nature Materials*. 2003. №2. 461-463.
43. Sitti M., Fearing R. S. Synthetic Gecko Foot-Hair Micro/Nano-Structures as Dry Adhesives. // *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 18, no. 7, p. 1055-1074, 2003.
44. Shah G. J., Sitti M. Modelling and design of biomimetic adhesives inspired by gecko foot-hairs. // *IEEE Conference on Robotics and Biomimetics*. Shenyang, China. 2004.
45. Zhao Y., Tong T., Delzeit L., Kashani A., Meyyappan M., Majumdar A. Interfacial energy and strength of multiwalled-carbon-nanotube-based dry adhesive. // *J. Vac. Sci. Technol.* 2006 B 24(1). 1071-1023
46. Sitti M. High aspect ratio polymer micro/nano-structure manufacturing using nanoembossing, nanomolding and directed self-assembly. // *IEEE/ASME Advanced mechatronics conference*. Kobe. Japan. 2003
47. Schmitz G. J., Brucker Ch., Jacobs P. Manufacture of high-aspect-ratio micro-hair sensor arrays. // *Journal of micromechanics and microengineering*. 2005. № 15. 1904-1910.
48. Castelino K., Srinath S., Sitti M. Manufacturing of two and three-dimensional micro/nano structures by integrating optical tweezers with chemical assembly. // *Robotica*. July 2005. V. 23. issue 4. 435-439.

-
49. Kim S., Sitti M. Biologically inspired polymer microfibers with spatulate tips as repeatable fibrillar adhesives. // *Applied physics letters*. №89, 261911, 2006.
50. Shan J., Mei T., Ni L., Chen S., Chu. J. Fabrication and adhesive force analysis of biomimetic gecko foot-hair array. // *Proceedings of the 1st IEEE international conference on nano/micro engineered and molecular systems, Zhuhai, China*, pp. 1546-1549, January 18-21, 2006.
51. Derjagin B. V., Muller V. M., Toporov Yu. P. Effect of contact deformations on adhesion of particles. *J. Colloid Interface Sci.*, 53:314–326, 1975.
52. K. L. Johnson, K. Kendall, and A. D. Roberts. Surface energy and contact of elastic solids. *Proc. R. Soc. Lond. A*, 324:301, 1971.
53. Кочетов В. Т., Кочетов М. В., Павленко А. Д. Сопротивление материалов // СПб. БХВ-Петербург, 2004. с. 262 - 263
54. Тимошенко С. П. Курс теории упругости // Киев, Наукова думка, 1972, с. 262
55. Autumn K., Majidi C., Groff R. E., Dittmore A., Fearing R. Effective elastic modulus of isolated gecko setal arrays // *The Journal of Experimental Biology* 2006, 209, 3558 - 3568
56. Дерягин Б. В. Что такое трение // М.: Изд. Акад наук СССР, 1952, с. 176.
57. Wang H., Mei T., Wang X., Lin X. Interaction and Simulation Analysis between the Biomimetic Gecko Adhesion Array and Rough Surface // *Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics & automation*, 2005, Niagara Falls, Canada, pp. 1063-1068
58. Wang H., Mei T., Wang X. Modelling and Rough Surface Compliance Analysis of Biomimetic Micro/Nano Adhesive Array // *Proceedings of the 2007*

International Conference on Information Acquisition, Jeju City, Korea, pp. 168-172

59. Kim T. W., Bhusham B. Adhesion analysis of multi-level hierarchical attachment system contacting with a rough surface // J. Adhesion, Sci. Technol., Vol. 21, № 1, 2007, pp. 1-20

60. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров) // М.: Наука, 1974, с. 575

61. Menon C., Murphy M., Angrilli F., Sitti M. WaalBots for Space Applications // IAC-04-IAF-I.3.B

62. Ландау Л. Д., Лившиц Е. М. Теоретическая физика. Т. VII. Теория упругости. М.: Наука. Гл. ред. физ. мат. лит., 1987. – 248 с.

63 Israelachvili J. Intermolecular and surface forces. 2nd ed. // Academic Press. London. 1992

64. Зозуля В. В., Мартыненко А. В., Лукин А. Н. Механика материалов. // Харьков, изд-во Национ. ун-та внутр. дел, 2001. – 404 с., с. 133