

ТОНКОПЛЁНОЧНЫЕ ЭЛЕКТРОДЫ АКТУАТОРОВ НА ОСНОВЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭЛАСТОМЕРА ДЛЯ СИСТЕМЫ ВИБРОИЗОЛЯЦИИ

© 2024

- В. С. Щербакова** студент;
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана;
viktoria.sherbakova97@gmail.com
- А. М. Базиненков** кандидат технических наук, доцент;
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана;
ambazinenkov@bmstu.ru
- С. В. Сидорова** кандидат технических наук, доцент;
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана;
sidorova@bmstu.ru
- А. Д. Купцов** аспирант;
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана;
alex-kouptsov@yandex.ru
- Д. А. Иванова** аспирант;
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана;
Ivanova_D_A@bk.ru

Прецизионное исследовательское и технологическое оборудование, как правило, не способно обеспечить свои паспортные характеристики без качественной системы вибрационной защиты. Активная виброизоляция объекта обеспечивается с помощью дополнительного источника движения – актуатора. Наиболее перспективные по точностным характеристикам актуаторы реализуются на основе интеллектуальных материалов, таких как материалы с памятью формы, пьезоэлектрические и магнитострикционные материалы, электро- и магнитоактивные жидкости и эластомеры. Актуаторы на основе одного из типов электроактивных полимеров, диэлектрических эластомеров, показывают высокие характеристики по точности и быстродействию и работают за счёт деформации рабочего тела под действием высокой разности потенциалов электрического поля. В работе представлено сравнение актуаторов на основе листовых и тонкоплёночных управляющих электродов. Оценено влияние качества поверхности полимера и типа электродов на диапазон перемещений актуатора и максимальные амплитуды колебаний, которые способна подавлять система на основе диэлектрического эластомера. Показано, что формирование электрода методом магнетронного распыления в вакууме позволяет создать тонкоплёночный слой меди, который покрывает эластомер, несмотря на развитую поверхность. Отмечено, что после ионной обработки поверхность эластомера приобретает более равномерную, регулярную структуру, а тонкоплёночный слой электрода качественно формируется по топологии эластомера.

Вибрационная защита; виброизоляция; диэлектрический эластомер; актуатор; деформация; вакуум; тонкие плёнки; ионная обработка

Цитирование: Щербакова В.С., Базиненков А.М., Сидорова С.В., Купцов А.Д., Иванова Д.А. Тонкоплёночные электроды актуаторов на основе диэлектрического эластомера для системы виброизоляции // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2024. Т. 23, № 3. С. 154-166.
DOI: 10.18287/2541-7533-2024-23-3-154-166

Введение

В современном производстве и исследовательской деятельности одной из распространённых проблем является негативное влияние вибраций на эффективность и надёжность различных устройств и характеристики технологических процессов. Особенно проблема актуальна для современного оборудования электронного машиностроения, где размеры объектов сравнимы с размерами атомов. Внешняя вибрация может

привести к дефектам изделий, изготавливаемых различными методами литографии, лазерной и ионно-лучевой обработкой, а также параметрическим отказам оборудования и отказам функционирования.

Наиболее эффективным методом вибрационной защиты является виброизоляция, подразделяющаяся на активную и пассивную. В первом случае устройство не использует энергию дополнительного источника, такая защита эффективна только при узком диапазоне частот, и к её недостаткам относится отсутствие возможности регулировки характеристик устройства. Активная виброизоляция достигается за счёт использования различных приводов (актуаторов), которые могут принципиально отличаться между собой по физическому принципу действия. Активные элементы таких устройств позволяют контролировать реакцию системы при различных воздействиях и управлять ею. Среди актуаторов в настоящее время особое внимание привлекают механизмы на основе интеллектуальных материалов (англ. smart materials), меняющих свои свойства под внешним воздействием различной природы. К ним, в числе прочих, относятся пьезоэлектрические и магнестрикционные материалы, электро- и магнитоэологические жидкости, а также электро- и магнитоактивные эластомеры.

Принцип работы пьезоэлектрического актуатора основан на обратном пьезоэлектрическом эффекте, под действием электрического поля возникает упорядочено расположение диполей, проводящее к механической деформации материала, которая зависит от направления поляризации [1; 2]. Конструкция актуатора базируется на направлении его деформации, которая разделяется на поперечную, продольную и сдвиговую [3]. Такие устройства позволяют достигать минимальной погрешности позиционирования (до 0,3 нм) и высокого быстродействия. Однако имеются явные недостатки: низкая грузоподъёмность, низкий диапазон возможных деформаций без использования мультиплицирующего механизма.

Актуатор магнестрикционный, принцип действия которого основывается на эффекте магнестрикции, аналогичен по своим достоинствам пьезоэлектрическому. Деформации возникают за счёт смещения частиц под действием магнитного поля и не зависят от направления поля [4]. Такие актуаторы обеспечивают широкий диапазон перемещений, но чувствительны к внешним магнитным воздействиям и температуре.

Актуаторы на основе магнитоэологической и электроэологической жидкостей представляют собой гидравлические приводы с соответствующей рабочей неньютоновской жидкостью. Они имеют высокие быстродействие, нагрузочную способность и точность, однако более сложны в реализации за счёт необходимости применения насосного оборудования и гидравлической системы [3].

Актуатор на основе магнитоэологического эластомера (МРЭ) работает за счёт того, что МРЭ изменяет свои размеры под действием внешнего магнитного поля за счёт перестраивания частиц дисперсной фазы в цепочки по линиям магнитного поля. Однако, их применение в качестве виброизоляторов затрудняется малым временем реакции, ограниченным нарастанием магнитного поля [5].

Одним из наиболее перспективных в данной области среди интеллектуальных материалов является диэлектрический эластомер (ДЭ). Данный материал относится к подгруппе электроактивных полимеров (ЭАП), изменяющих свои размеры при приложении к ним электрического поля. ЭАП разделяются на ионные, в которых деформация осуществляется за счёт смещения ионов, и электронные, в которых деформация осуществляется в результате действия электростатических сил. ДЭ относится ко второй группе и изменяет свои размеры под действием электрического поля за счёт суммарного действия эффекта электрострикции и сил электростатики, как показано на рис. 1. К его преимуществам относятся низкий удельный вес, высокая податливость, высокое быстродействие и высокий диапазон создаваемых под внешним полем деформаций [6].

ДЭ состоит из упругой матрицы и высокодиэлектрического наполнителя, необходимого для повышения деформации материала под действием электрического поля. Пропорции сочетания данных компонентов оказывают значительное влияние на свойства материала и характеристики актуатора [7; 8].

Конструкцию актуатора на основе ДЭ удобно разработать на основе прототипов конструкций пьезоактуаторов, а именно ползункового [3; 9; 10] или пакетного [11]. Наиболее простой конструкцией является плоский конденсатор: ДЭ плотно зажимается между двумя электродами и при подаче электрического поля под действием электростатических сил и электрострикции происходит деформация, как показано на рис. 1.

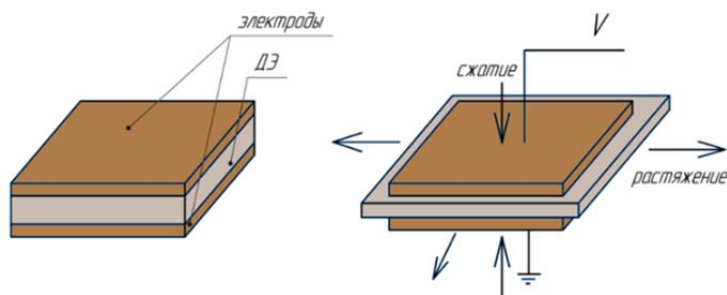


Рис. 1. Принцип действия актуатора на основе диэлектрического эластомера

Однако, для использования в качестве основы устройства для активной виброизоляции ДЭ должен выдерживать значительное давление и выдерживать высокую нагрузку, что невозможно с учётом его минимальной толщины. Для повышения грузоподъёмности (нагрузочной способности) и увеличения диапазона создаваемой деформации используют многослойные конструкции из последовательно сложенных слоёв ДЭ, зажатых между электродами. В данном случае общая деформация суммируется из деформаций каждого отдельного слоя. При этом погрешность позиционирования такжекратно возрастёт. Схема такого многослойного устройства представлена на рис. 2.

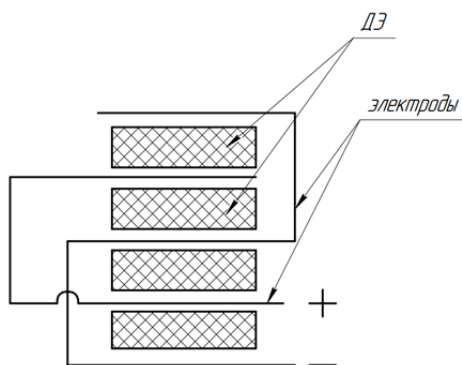


Рис. 2. Многослойная конструкция актуатора на основе диэлектрического эластомера

Изготовление подобного актуатора включает два основных этапа: создание ДЭ, соединение эластомеров вместе с электродами в столбчатую конструкцию. При этом важнейшее влияние на характеристики актуатора оказывают электроды, обеспечивающие подачу внешнего электрического поля на эластомер.

Типы электродов для актуатора на основе диэлектрического эластомера

Важным фактором, определяющим эффективность актуатора на основе ДЭ, является природа применяемых электродов. Они должны обладать высокой электропроводностью, низким модулем упругости и высокой эластичностью, чтобы не затруднять деформацию ДЭ под действием внешнего поля. Также важным требованием является высокая адгезия электродов и полимера. Возможными отрицательными факторами являются перекося конструкции после соединения с электродами и воздушные зазоры между элементами.

В литературных источниках отражены разнообразные способы реализации электродов: 1 – тонкоплёночный электрод, нанесённый вакуумными методами; 2 – электрод, вырезанный из металлического листа или фольги; 3 – жидкий электрод из проводящей пасты; 4 – электрод на основе углеродных нанотрубок.

Формирование покрытия тонкоплёночного электрода можно проводить любым известным способом нанесения тонких плёнок в вакууме, так как необходимо нанести хорошо проводящий слой металла. Наиболее простым в реализации является метод термического испарения [12]. Метод позволяет обеспечить необходимую податливость и эластичность электродов и добиться их минимальной толщины от 10 до 50 нм. Высокая адгезия позволяет обеспечить жёсткость конструкции актуатора, однако процесс и оборудование для нанесения покрытия достаточно дорогостоящие и сопровождаются усложнением сборки актуатора в части подвода потенциала к тонкоплёночным электродам.

Другим технологическим решением является получение электродов из листа или фольги механической обработкой заготовки. Медные электроды можно вырезать из листа, минимальная толщина которого согласно действующим стандартам – 0,4 мм. Данный метод значительно дешевле вакуумного нанесения тонких плёнок, прост и удобен в реализации, может быть осуществлён на универсальном оборудовании и позволяет легко подвести потенциал к электродам. Однако за счёт высокой жёсткости листовых электродов существенно снижается потенциальная деформация ДЭ. Технология изготовления актуатора при этом осложняется за счёт необходимости создания плотного соединения между ДЭ и электродом, исключая возникновение воздушных зазоров и перекося конструкции.

Аналогично возможно изготовить электроды из медной фольги, минимальная толщина которой согласно стандартам 0,25 мм. Фольга будет оказывать меньшее сопротивление деформации ДЭ под действием внешнего электрического поля, однако в этом случае сложно обеспечить плотное и равномерное соединение между слоями. При соединении имеется большая вероятность возникновения дефектов, в частности, коробления фольги.

Одной из наиболее эффективных проводящих паст, которая может быть использована в качестве жидких электродов, является соединение на основе золота и платины, минимальная толщина, которую возможно обеспечить этими материалами, составляет от 10 до 24 мкм. Такой метод создания электродов отличается простотой, быстротой и дешевизной. Однако полностью отсутствует жёсткость конструкции, устранить которую невозможно, что сопровождается сложностью подвода потенциала и потенциальными малыми массами перемещаемых актуатором объектов.

Углеродные нанотрубки (УНТ) эффективно используются благодаря своей термостойкости, механической податливости и химической стойкости. Однако острые концы УНТ могут служить концентраторами электрического поля и потенциально вызывать пробой окружающего воздуха. К недостаткам УНТ относятся дороговизна, высокие

требования к технологии нанесения на полимер и необходимость специализированного дорогостоящего оборудования.

Наиболее простым и доступным методом реализации электродов является листовый материал, однако нет информации о влиянии этих электродов на деформацию полимеров. Альтернативным методом является нанесение покрытия электродов в вакууме, позволяющее создать наиболее равномерную и эффективную конструкцию. Вместе с тем в литературе отсутствует информация о режимах обработки полимеров для реализации этого метода, а также сомнительна экономическая эффективность этого метода.

Изготовление образцов диэлектрических эластомеров

Для сравнения различных типов электродов было изготовлено необходимое количество ДЭ в лаборатории АО «Плутон» (г. Москва, РФ). В качестве упругой матрицы был выбран силиконовый компаунд СИЭЛ 159-322А, характеристики которого представлены в табл. 1. Одним из наиболее эффективных наполнителей, согласно литературе, является титанат бария, поэтому модификация матрицы происходила с добавлением данного порошка [13; 14]. Характеристики выбранного наполнителя представлены в табл. 2.

Таблица 1. Характеристики СИЭЛ 159-322А

Прочность при растяжении, МПа	3,0
Относительное удлинение при разрыве, %	от 160 до 170
Удельное объёмное электрическое сопротивление, Ом·м	$1 \cdot 10^{13}$
Электрическая прочность, кВ/мм	27
Диапазон рабочих температур, °С	от -60 до +200

Таблица 2. Характеристики титаната бария марки ТБК-1

Влажность, %	0,1
Потери при прокаливании, %	0,1
Мольное соотношение ВаО/ТiО ₂	0,96
Средний размер частиц, мкм	0,5

Изготовление ДЭ состояло из следующих последовательно выполняемых этапов:

1. Модифицирование порошком титаната бария силикона с отвердителем в массовом соотношении 1:1.
2. Обезгаживание полимерной смеси при давлении 1 мбар в течение 10 мин.
3. Полимеризация эластомера в печи в форме (рис. 3) в течение 30 мин при температуре 150°С.
4. Охлаждение и извлечение образца с последующей его вырубкой.

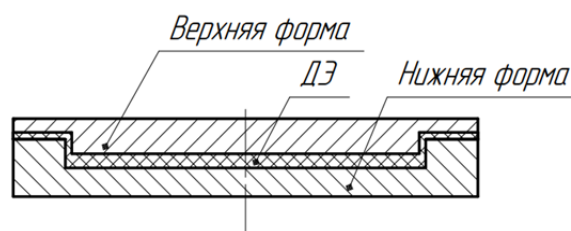


Рис. 3. Схема полимеризации диэлектрического эластомера

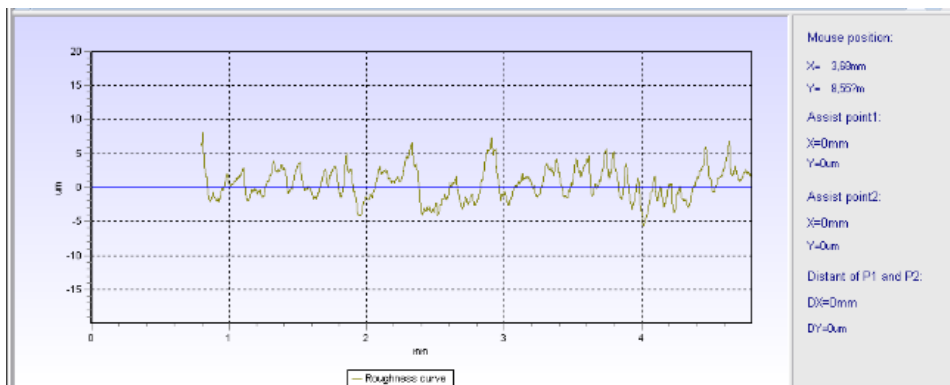
В дальнейшем происходило формирование электродов на поверхности ДЭ методами нанесения тонких плёнок в вакууме.

Тонкоплёночные электроды

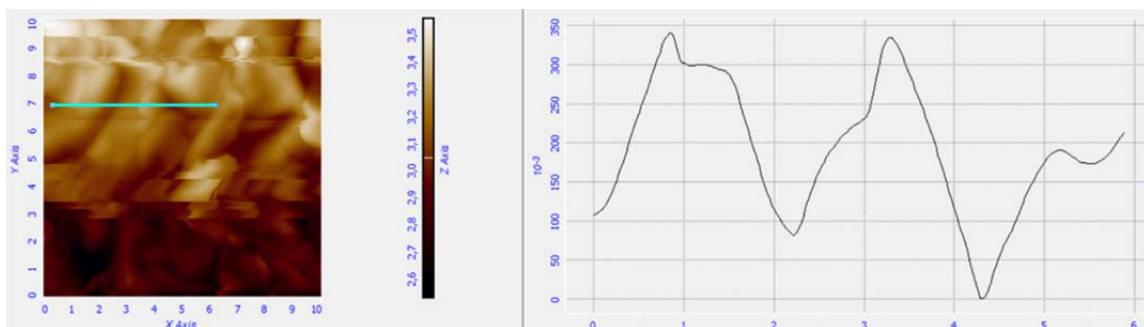
Решающее влияние на качество тонкоплёночных электродов оказывает качество поверхности полимера под нанесение токопроводящего покрытия.

Морфология поверхности, в том числе шероховатость, влияет на качество адгезии между плёнкой электрода и подложкой, а также общую толщину проводящего покрытия. Первичным параметром для обеспечения высокого качества формирования плёнки на образце выбирается шероховатость. Оценка профиля структуры и характерных значений осуществлялась при помощи сертифицированного профилометра TR220. Возможности атомно-силового микроскопа позволяют оценить топографию мягких поверхностей, которыми являются эластомеры, поэтому оценку шероховатости поверхности эластомера проводили на профилометре и атомно-силовом микроскопе.

Осаждение плёнки проводилось методом магнетронного распыления в вакууме [15; 16] из медной мишени диаметром 50,8 мм. Расстояние от мишени до подложки составляло 65 мм, что соответствует скорости осаждения покрытия 35 нм/мин в данной системе. В качестве источника питания магнетрона использовали RF блок питания с мощностью разряда 60 Вт. Предварительная ионная обработка проведена при токе разряда 30 мА и ускоряющем напряжении 530 В. Результаты и фактический профиль поверхности показаны на рис. 4.



а



б

Рис. 4. Результаты измерения шероховатости поверхности эластомера:
а – на профилометре; б – на атомно-силовом микроскопе

По параметру шероховатости R_a значения для поверхности эластомера находятся в диапазоне от 2,0 до 2,2 мкм. Данное измерение позволяет констатировать факт, что для изготовления каскадной структуры эластомер-проводник необходимо осаждавать плёнки меди толщиной порядка 2,5 мкм, чтобы верхний атомарный слой проводника был выше пиков шероховатости эластомера. При этом стоит заметить, что плёнка меди

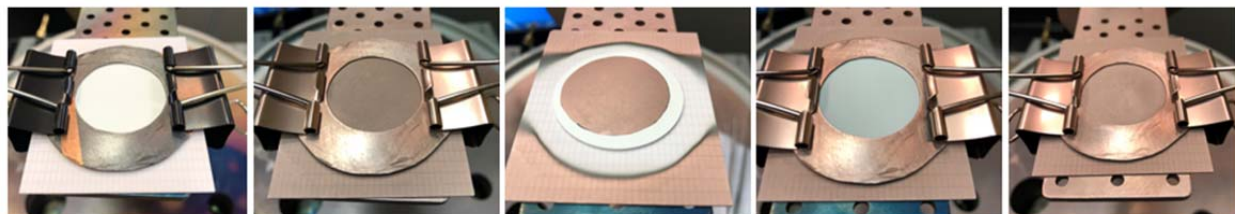
будет иметь шероховатость на порядок меньше шероховатости эластомера, что подтверждается результатами измерения шероховатости поверхности образца-свидетеля (чистой подложки ситалла и плёнки, сформированной на этой подложке).

Измерения шероховатости поверхности ситалла показали значения порядка 30 нм. Плёнка меди толщиной 540 нм на такой же подложке имеет шероховатость от 8 до 10 нм. Это говорит о том, что атомы осаждаемой плёнки при предварительном ионном ассистировании сначала заполняют «впадины» подложки, затем начинают свой рост на менее развитой поверхности.

В результате проведённых исследований обнаружено, что на диэлектрическом эластомере возможно формирование медной плёнки толщиной 540 нм таким образом, что при образовании радиуса изгиба эластомера с плёнкой порядка 5 мм не происходит растрескивание и отслоение плёнки благодаря предварительной ионной обработке ионами аргона, а также высокоэнергетическим влиянием осаждаемых атомов меди магнетронного распыления.

Применение предварительной ионной обработки эластичного материала перед формированием слоя металлизации подтвердило свою целесообразность. Возможность реализации последовательности обработки эластомера в вакууме в едином технологическом цикле позволила исключить попадание нежелательных компонентов между поверхностью эластомера и тонкоплёночным покрытием, тем самым обеспечив более плотное прилегание тонкоплёночного электрода.

Для последующей сборки четырёхслойных актуаторов формирование электродов проводилось на круглых образцах эластомера методом магнетронного распыления меди в вакууме на установке МВТУ-11-1МС (рис. 5), разработанной на кафедре электронных технологий в машиностроении Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана.



*Рис. 5. Маршрут изготовления слоёв актуатора
(формирование тонкоплёночных электродов с обеих сторон эластомера)*

Образцы эластомера после жидкостной очистки помещались на подложкодержатель в специальную оснастку. После откачки вакуумной камеры до рабочего давления ионного источника проводилась ионная обработка образцов, далее ионный источник выключался и проводилось магнетронное распыление меди с отработанными ранее режимами нанесения покрытия. На двух образцах из четырёх наносился электрод с обеих сторон для облегчения последующего соединения элементов актуатора.

Создание экспериментального образца актуатора

В лаборатории кафедры электронных технологий в машиностроении Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана была произведена сборка четырёхслойных актуаторов на основе изготовленных ДЭ. Из ДЭ были вырезаны одинаковые цилиндрические образцы, размеры которых представлены на рис. 6.

При использовании двух жёстких электродов, диаметром 32 мм и толщиной 0,5 мм соединение происходило с помощью смеси силикона с отвердителем без модификатора. Два электрода были соединены с эластомерами как показано на рис. 7.

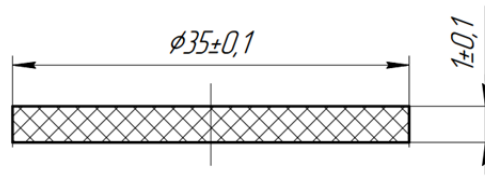


Рис. 6. Размеры ДЭ для актуаторов

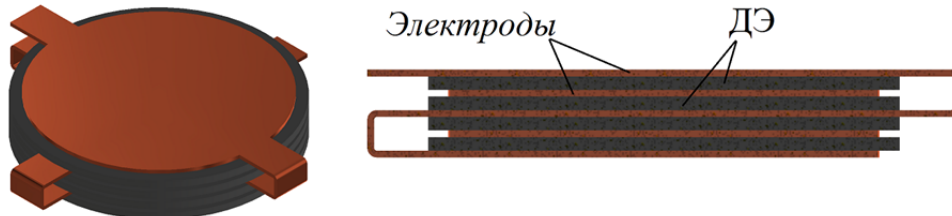


Рис. 7. Конструкция актуатора с жёсткими электродами

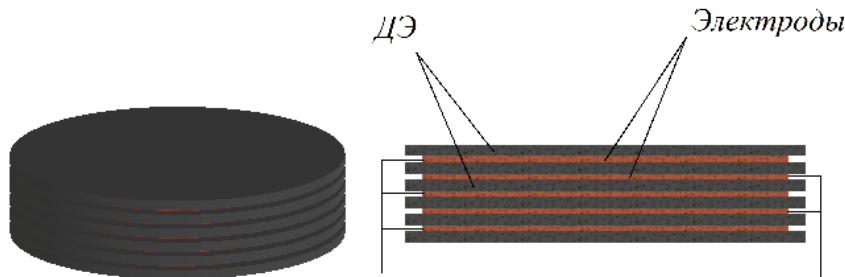


Рис. 8. Конструкция актуатора с тонкоплёночными электродами

После сборки актуатора осуществлялась полимеризация в печи в течение 30 мин при температуре 150°C . После остывания актуатора при комнатной температуре к электродам были припаяны провода для подачи рабочего напряжения.

Аналогично была собрана конструкция с тонкоплёночными электродами. После нанесения электродов с двух сторон на эластомер они склеивались с помощью токопроводящего клея, слой которого наносился механически. В момент склеивания к электродам подводился и приклеивался провод для подачи потенциала (рис. 8).

Исследования деформации с листовыми и тонкоплёночными электродами

С помощью лабораторного стенда было проведено измерение перемещения изготовленных актуаторов на основе ДЭ с разными электродами. На образцы подавалось напряжение от 0 до 3 кВ с высоковольтного блока питания.

Схема стенда изображена на рис. 9. Напряжение подавалось с помощью высоковольтного блока питания (ВВБП) на делитель напряжений (ДН), который подключался к электродам испытуемого образца. Сам образец находился на изолированной поверхности, над которой устанавливался ёмкостной датчик на расстоянии до 1 мм, подключенный к блоку управления (БУДП). Датчик измерял положение исследуемого объекта пока подаваемое напряжение пошагово увеличивалось.

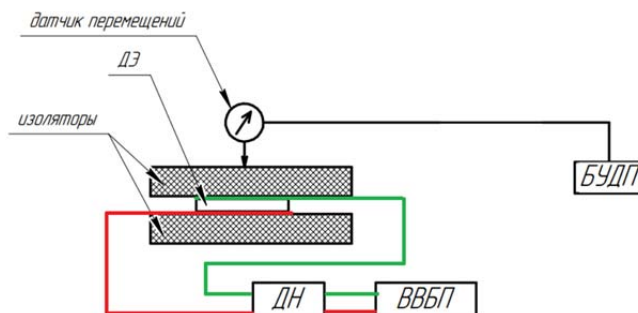


Рис. 9. Схема измерения перемещения актуаторов под действием электрического поля

В результате проведенных исследований получены зависимости деформации изготовленных актуаторов под действием внешнего электрического поля. Максимальное перемещение актуаторов при разности потенциалов 2,7 кВ с жесткими электродами составило 4,5 мкм, а актуатора с тонкопленочными электродами 7,5 мкм (рис. 10). Однако, была обнаружена значительная погрешность в результатах дрейфа положения исследуемых образцов. Так как данная погрешность одинакова для обоих образцов, то сравнение образцов может быть осуществлено без ущерба для достоверности результатов.

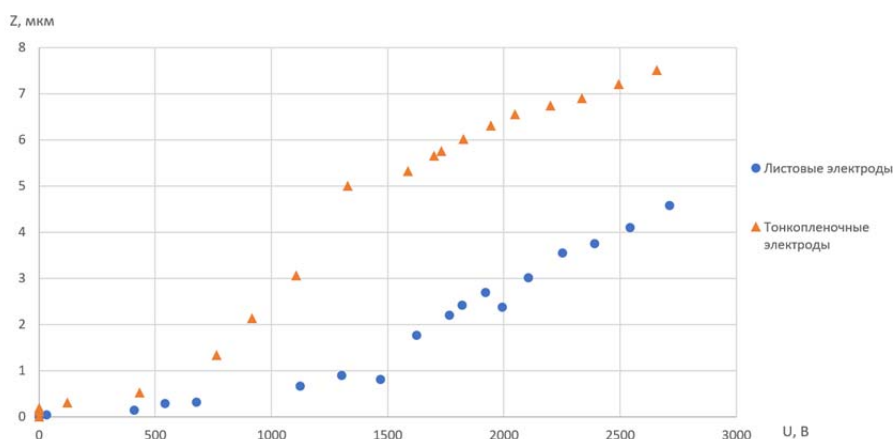


Рис. 10. Зависимость деформации под действием электрического тока от подаваемого напряжения для актуатора с тонкопленочными и листовыми электродами

За счёт своей податливости актуаторы с тонкопленочными электродами показали большую деформацию по сравнению с листовыми электродами. Но существуют недостатки рассматриваемой технологии, такие как неравномерность клеевого соединения и техническая сложность создания потенциала.

Заключение

Выявлено, что одним из перспективных материалов для создания актуаторов систем активной виброизоляции является ДЭ за счёт низкого модуля упругости, высокой податливости, низкого времени отклика на управляющий сигнал.

Сравнительный анализ электродов для актуатора на основе ДЭ показал, что наиболее удобными в реализации являются листовые электроды, однако они ограничи-

вают деформацию ДЭ за счёт высокой жёсткости, а наиболее эффективными являются тонкоплёночные электроды за счёт высокой податливости, однако они гораздо дороже в реализации.

В результате проведённых исследований и измерений шероховатости поверхностей образца-свидетеля (ситалла) и эластомера выявлено, что для достижения малых значений шероховатости плёнки и полного «закупоривания» пиков шероховатости эластомера необходимо формировать проводящий слой электрода актуатора толщиной больше 2,5 мкм при начальной шероховатости ДЭ от 2,0 до 2,2 мкм.

Изготовление актуаторов с листовыми электродами позволило выявить такие дефекты, как непараллельность слоёв электродов при склеивании, повышенная жёсткость конструкции и перекося многослойной структуры.

Изготовление актуаторов с тонкоплёночными электродами позволяет создать конструкцию с минимальными перекосями, однако её изготовление осложняется трудоёмкостью подвода потенциалов к электродам.

Измерение деформации четырёхслойных актуаторов на основе ДЭ с титанатом бария в качестве модификатора под действием электрического поля показало, что деформация актуатора с листовыми электродами составляет 4,5 мкм при напряжении 2,7 кВ, а тонкоплёночного 7,5 мкм, что подтверждает большую эффективность тонкоплёночных электродов.

Библиографический список

1. Gao X., Yang J., Wu J., Xin X., Li Z., Yuan X., Shen X., Dong S. Piezoelectric actuators and motors: materials, designs, and applications // *Advanced Materials Technologies*. 2020. V. 5, Iss. 1. DOI: 10.1002/admt.201900716
2. Mohith S., Upadhy A.R., Navin K.P., Kulkarni S.M., Rao M. Recent trends in piezoelectric actuators for precision motion and their applications: a review // *Smart Materials and Structure*. 2021. V. 30, Iss. 1. DOI: 10.1088/1361-665X/abc6b9
3. Wang S., Rong W., Wang L., Hui X., Sun L., Mills J.K. A survey of piezoelectric actuators with long working stroke in recent years: classifications, principles, connections and distinctions // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2019. V. 123. P. 591-605. DOI: 10.1016/j.ymsp.2019.01.033
4. Tzou H.S., Lee H.-J., Arnold S.M. Smart materials, precision sensors/actuators, smart structures, and structronic systems // *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. 2004. V. 11, Iss. 4-5. P. 367-393. DOI: 10.1080/15376490490451552
5. Bastola A.K., Hossain M. A review on magneto-mechanical characterizations of magnetorheological elastomers // *Composites Part B: Engineering*. 2020. V. 200. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.108348
6. Li Z., Sheng M., Minqing W., Pengfei D., Li B., Chen H. Stacked dielectric elastomer actuator (SDEA): casting process, modeling and active vibration isolation // *Smart Materials and Structures*. 2018. V. 27, Iss. 7. DOI: 10.1088/1361-665X/aabea5
7. Пелссерс Э.Г.М., Хендрикс К.П., Хаккенс Ф.Й.Г., Хильгерс А., Ван Ден Энде Д.А., Джонсон М.Т. Управление жёсткостью для электроактивных исполнительных устройств: патент РФ № 2748051; опубл. 19.05.2021; бюл. № 14.
8. Skov A.L., Yu L. Optimization techniques for improving the performance of silicone-based dielectric elastomers // *Advanced Engineering Materials*. 2017. V. 20, Iss. 5. DOI: 10.1002/adem.201700762
9. Zhang Z.M., An Q., Li J.W., Zhang W.J. Piezoelectric friction – inertia actuator – a critical review and future perspective // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2012. V. 62. P. 669-685. DOI: 10.1007/s00170-011-3827-z

10. Yao K., Uchino K., Xu Y., Dong S., Lim L.C. Compact piezoelectric stacked actuators for high power application // *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*. 2000. V. 47, Iss. 4. P. 819-825. DOI: 10.1109/58.852063

11. Manohar Shankar B.S., Amith Mathias K., Kulkarni S.M. Influence of filler and processing parameters on the mechanical properties of dielectric elastomer composites // *Materials Today: Proceedings*. 2020. V. 27, Part 1. P. 221-226. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.10.058

12. Панфилов Ю. Нанесение тонких плёнок в вакууме // *Технологии в электронной промышленности*. 2007. № 3 (15). С. 76-80.

13. Sikulskyi S., Mekonnen D.T., El Atrache A., Divo E., Kim D. Effects of ferroelectric fillers on composite dielectric elastomer actuator // *Actuators*. 2021. V. 10, Iss. 7. DOI: 10.3390/act10070137

14. Li J., Huang H., Morita T. Stepping piezoelectric actuators with large working stroke for nano-positioning systems: a review // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2019. V. 292. P. 39-51. DOI: 10.1016/j.sna.2019.04.006

15. Купцов А.Д., Сидорова С.В. Металлические тонкоплёночные покрытия для солнечных панелей // *Материалы XXV научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника» (16-22 сентября 2018 г., Судак, Крым)*. М.: Новелла, 2018. С. 187-192.

16. Sidorova S.V., Kouptsov A.D., Pronin M.A. Problems and solutions of automation of magnetron sputtering process in vacuum // *Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2020. V. 641. P. 944-952. DOI: 10.1007/978-3-030-39225-3_101

THIN-FILM ELECTRODES OF DIELECTRIC ELASTOMER-BASED ACTUATORS FOR AN ACTIVE VIBRATION CONTROL SYSTEM

© 2024

- V. S. Shcherbakova** Student;
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation;
viktoriasherbakova97@gmail.com
- A. M. Bazinenkov** Candidate of Science (Engineering), Associate Professor;
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation;
ambazinenkov@bmstu.ru
- S. V. Sidorova** Candidate of Science (Engineering), Associate Professor;
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation;
sidorova@bmstu.ru
- A. D. Kouptsov** Postgraduate Student;
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation;
alex-kouptsov@yandex.ru
- D. A. Ivanova** Postgraduate Student;
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation;
Ivanova_D_A@bk.ru

Precision research and technological equipment, as a rule, is not able to provide its specification characteristics without a high-quality vibration protection system. Active vibration control of an object is provided with the help of an additional source of movement, an actuator. The most promising high accuracy actuators are based on smart materials, such as materials with shape memory, piezoelectric and magnetostrictive materials, electro- and magnetic active fluids and elastomers. Dielectric elastomer is one of the types of electroactive polymers. Actuators based on a dielectric elastomer show high performance in terms of accuracy and speed and operate due to the controllable deformation of the elastomer under the action of a high voltage electric field. The paper provides a comparison of actuators based on sheet and thin film control electrodes. The influence of the quality of the polymer

surface and the type of electrodes on the travel range of the actuator and maximum amplitude of vibrations the system can suppress on the basis of a dielectric elastomer is estimated. The formation of the electrode by magnetron sputtering in vacuum makes it possible to create a thin-film layer of copper that covers the elastomer, despite the developed surface. The effect of ion treatment of an elastomer before coating on the quality of the formed electrode is considered. After the ion treatment, the surface of the elastomer acquires a more uniform regular structure. A thin-film electrode layer is formed according to the topology of the elastomer to an accomplished standard.

Vibration control; dielectric elastomer; actuator; deformation; vacuum; thin films; ion treatment

Citation: Shcherbakova V.S., Bazinenkov A.M., Sidorova S.V., Kouptsov A.D., Ivanova D.A. Thin-film electrodes of dielectric elastomer-based actuators for an active vibration control system. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2024. V. 23, no. 3. P. 154-166. DOI: 10.18287/2541-7533-2024-23-3-154-166

References

1. Gao X., Yang J., Wu J., Xin X., Li Z., Yuan X., Shen X., Dong S. Piezoelectric actuators and motors: materials, designs, and applications. *Advanced Materials Technologie*. 2020. V. 5, Iss. 1. DOI: 10.1002/admt.201900716
2. Mohith S., Upadhy A.R., Navin K.P., Kulkarni S.M., Rao M. Recent trends in piezoelectric actuators for precision motion and their applications: a review. *Smart Materials and Structure*. 2021. V. 30, Iss. 1. DOI: 10.1088/1361-665X/abc6b9
3. Wang S., Rong W., Wang L., Hui X., Sun L., Mills J.K. A survey of piezoelectric actuators with long working stroke in recent years: classifications, principles, connections and distinctions. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2019. V. 123. P. 591-605. DOI: 10.1016/j.ymssp.2019.01.033
4. Tzou H.S., Lee H.-J., Arnold S.M. Smart materials, precision sensors/actuators, smart structures, and structronic systems. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. 2004. V. 11, Iss. 4-5. P. 367-393. DOI: 10.1080/15376490490451552
5. Bastola A.K., Hossain M. A review on magneto-mechanical characterizations of magnetorheological elastomers. *Composites Part B: Engineering*. 2020. V. 200. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.108348
6. Li Z., Sheng M., Mingqing W., Pengfei D., Li B., Chen H. Stacked dielectric elastomer actuator (SDEA): casting process, modeling and active vibration isolation. *Smart Materials and Structures*. 2018. V. 27, Iss. 7. DOI: 10.1088/1361-665X/aabea5
7. Pelssers E.G.M., Hendriks C.P., Hakkens F.J.G., Hilgers A., Van Den Ende D.A., Johnson M.T. *Upravlenie zhestkost'yu dlya elektroaktivnykh ispolnitel'nykh ustroystv* [Stiffness control for electroactive executive devices]. Patent RF, no. 2748051, 2021. (Publ. 19.05.2021, bull. no. 14)
8. Skov A.L., Yu L. Optimization techniques for improving the performance of silicone-based dielectric elastomers. *Advanced Engineering Materials*. 2017. V. 20, Iss. 5. DOI: 10.1002/adem.201700762
9. Zhang Z.M., An Q., Li J.W., Zhang W.J. Piezoelectric friction – inertia actuator – a critical review and future perspective. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2012. V. 62. P. 669-685. DOI: 10.1007/s00170-011-3827-z
10. Yao K., Uchino K., Xu Y., Dong S., Lim L.C. Compact piezoelectric stacked actuators for high power application. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*. 2000. V. 47, Iss. 4. P. 819-825. DOI: 10.1109/58.852063
11. Manohar Shankar B.S., Amith Mathias K., Kulkarni S.M. Influence of filler and processing parameters on the mechanical properties of dielectric elastomer composites. *Materials Today: Proceedings*. 2020. V. 27, Part 1. P. 221-226. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.10.058
12. Panfilov Yu. Deposition of thin films in vacuum. *Tekhnologii v Elektronnoy Promyshlennosti*. 2007. No. 3 (15). P. 76-80. (In Russ.)

13. Sikulskyi S., Mekonnen D.T., El Atrache A., Divo E., Kim D. Effects of ferroelectric fillers on composite dielectric elastomer actuator. *Actuators*. 2021. V. 10, Iss. 7. DOI: 10.3390/act10070137

14. Li J., Huang H., Morita T. Stepping piezoelectric actuators with large working stroke for nano-positioning systems: a review. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2019. V. 292. P. 39-51. DOI: 10.1016/j.sna.2019.04.006

15. Kuptsov A.D., Sidorova S.V. Thin film metal coatings for solar panels. *Proceedings of the XXV International Scientific and Technical Conference «Vacuum Science and Technology» (September, 16-22, 2018, Sudak, Crimea)*. Moscow: Novella Publ., 2018. P. 187-192. (In Russ.)

16. Sidorova S.V., Kouptsov A.D., Pronin M.A. Problems and solutions of automation of magnetron sputtering process in vacuum. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2020. V. 641. P. 944-952. DOI: 10.1007/978-3-030-39225-3_101