

УДК 539.371

PACS: 81.40.Jj

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-6-78-83

EDN: SPPWTT



Исследование механических напряжений в конструкции эластичной подложки с металлическими проводниками различной формы

Н. С. Горлов, Д. В. Вертянов, С. П. Тимошенко, Р. Н. Жумагали, С. И. Гладкова

При формировании эластичных соединений в связи с непластичной природой металлов требуется особая изогнутая форма проводников. Это позволяет уменьшить возникающие напряжения в металле, которые могут привести к возникновению дефектов топологического рисунка. Исследованы механические деформации в конструкции эластичного носителя на основе полидиметилсилоксана с медными и золотыми проводниками различных форм. По результатам моделирования были определены зоны с максимальной напряженностью, в которых наиболее вероятно возникновение дефектов при одноосном растяжении для каждого типа проводника. Определено влияние толщины эластичных подложек при разных приложенных нагрузках на механические напряжения в зависимости от формы проводника. Рассмотрено влияние скруглений в местах наибольших напряжений в проводниках. Определена лучшая форма проводника из рассмотренных, позволяющая в большей степени компенсировать приложенные нагрузки одномерной деформации.

Ключевые слова: эластичная электроника, эластичные носители, кремнийорганический компаунд, механические деформации, полидиметилсилоксан, подковообразная форма, носимая биоэлектроника.

Введение

В настоящее время в мире активно развивается направление эластичной электроники (Stretchable Electronics). Часто для носимых и имплантируемых устройств требуются гиб-

кие подложки, повторяющие неровные формы того, на что они крепятся. Например, в области биомедицины, они должны повторять формы тела пациента, минимально ограничивая его физические возможности. При этом требуется не только гибкая форма, но и возможность растяжения/ сжатия при движении.

Возможность адаптации формы электронных устройств во время использования остается актуальной задачей, требующей разработки новых технологических решений и проведение исследований конструктивных и технологических принципов их формирования. Изделия такого типа должны иметь возможность компенсировать большие деформации, при этом оставаясь надежными и сохраняя свою функциональность.

При формировании эластичных межсоединений в связи с непластичной природой металлов требуется особая структура проводников [1, 2]. В случае, когда соединения вы-

Горлов Николай Сергеевич, аспирант.

E-mail: gorlov.nikolai.s@mail.ru

Вертянов Денис Васильевич, доцент, к.т.н.

Тимошенко Сергей Петрович, профессор, д.т.н.

Жумагали Райымбек Нуржанулы, магистрант.

Гладкова Светлана Игоревна, студент.

Национальный исследовательский университет «МИЭТ».

Россия, 124498, Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1.

Статья поступила в редакцию 21.08.2023

После доработки 8.09.2023

Принята к публикации 19.09.2023

© Горлов Н. С., Вертянов Д. В., Тимошенко С. П., Жумагали Р. Н., Гладкова С. И., 2023

полнены из твердых металлов, геометрия проводников должна быть изогнутой.

В научных работах по данной теме были рассмотрены различные конструкции эластичных межсоединений [3–9]. Особое внимание уделялось именно форме проводников, т. к. они подвержены наибольшему механическим нагрузкам. В металле при растяжении могут возникать механические дефекты вплоть до полного разрыва структуры и потери электрического соединения [10].

Для возможности выбора наиболее подходящей формы проводника, способной компенсировать в большей степени приложенные нагрузки одномерной деформации, было необходимо провести теоретическое исследование влияния таких деформаций на эластичные подложки с проводниками различной формы.

Методика исследования и материалы

В качестве объекта исследования выбрана структура эластичного носителя, состоящая из трех элементов: нижнего слоя кремнийорганического материала, металлического проводника (для примера показан подковообразный проводник), и верхнего слоя кремнийорганического материала (рис. 1).

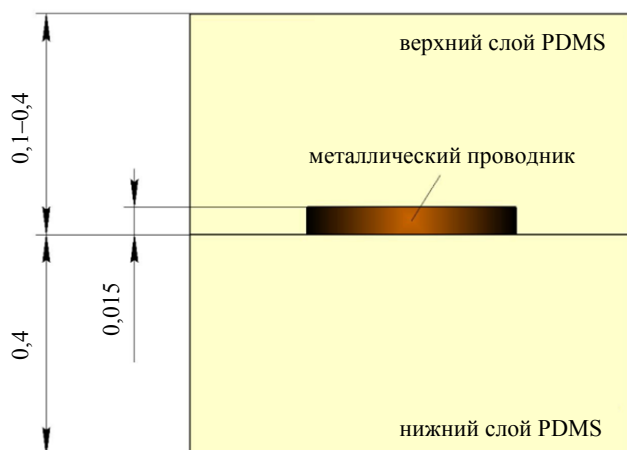


Рис. 1. Структура эластичного носителя

В рассматриваемой модели эластичного носителя заложены проводники различных форм:

- подковообразная форма;

- треугольная форма с остроугольными, прямоугольными и скругленными вершинами;
- подковообразная форма с прямоугольными вставками в местах наибольших механических напряжений;
- форма прямоугольного меандра.

Общие геометрические параметры конструкции представлены в таблице 1.

Таблица 1

Общие геометрические параметры конструкций

Параметр	Значение
Толщина металлического проводника, мкм	15
Ширина проводника, мм	0,1
Толщина нижнего слоя кремнийорганического материала, мм	0,4
Толщина верхнего слоя кремнийорганического материала, мм	0,1; 0,2; 0,4
Ширина зазора от края эластичного носителя до проводника, мм	0,6

Методика численного моделирования в ПО COMSOL Multiphysics заключается в фиксировании одной из боковых стенок и приложении нагрузки 0,1–0,25 МПа на одноосное растяжение к другой.

В таблице 2 приведены остальные параметры конструкций для каждой рассматриваемой формы проводника.

В качестве кремнийорганического материала выбран полидиметилсилоксан (Polydimethylsiloxane – PDMS) SYLGARD 184 компании Dow Corning. Полидиметилсилоксан – нетоксичный, биосовместимый и, что самое главное, высокопластичный материал с относительным удлинением при разрыве 85 % и прочностью на растяжение 6,7 МПа, для моделирования были заданы коэффициент Пуассона 0,495, модуль Юнга 1,5 МПа, плотность 1030 кг/м³.

Sylgard 184 относится к мягким высокоэластичным материалам – некристаллическим полимерам (эластомерам). В эластомерах структурные микроблоки упорядоченной структуры имеют флуктуационное происхождение и характеризуются определенным конечным временем жизни. В связи с молекулярной подвижностью флуктуационных структур эластомеры характеризуются медленным релаксационным процессом.

Таблица 2

Геометрические параметры проводников различных формы

Параметр	Геометрические параметры проводника			
	Подковообразной формы	Треугольной формы	Подковообразной формы с прямоугольными вставками	В форме прямоугольного меандра
Амплитуда меандра, мм	1,3	640; 1060; 1270; 1470; 2250	1,3	0,3; 0,6; 1; 1,3
Внутренний радиус меандра, мм	0,3	–	0,3	–
Внешний радиус меандра, мм	0,4	–	0,4	–
Минимальный зазор между сегментами, мкм	190	–	240; 390	–
Период меандра, мм	1	1; 2,5	1,05; 1,2	1
Длина проводника, мм	1,5	1,5; 3,7	1,6; 1,9	1,5
Угол при вершине, °	–	90; 60; 45; 30	–	–
Внутренний радиус скругления, мкм	–	104; 170	–	–
Внешний радиус скругления, мкм	–	15; 50	–	–

Высокоэластическая деформация полимера связана с ориентацией и перемещением звеньев гибких цепей, при котором не меняется среднее расстояние между ними. Это позволяет восстанавливать свою форму после прекращения нагрузки, как и у упругих твердых тел. Однако по другим свойствам эластомеры более близки к жидкостям и подчиняются закону Паскаля. Жидкости и полимеры имеют аналогичную структуру в ближнем порядке, в связи с чем их ТКЛР и коэффициенты сжимаемости близки и намного больше, чем у твердых тел.

В исследовании рассматривались одномерная деформация структуры. Элементарная работа (δA) – это работа системы против внешнего давления. Для одномерной деформации эластомера:

$$\delta A = pdV - FdL,$$

где p – давление внешней среды, dV – бесконечно малое изменение объема, $F = s_0 f$ – внешняя приложенная сила, f – условное растягивающее напряжение, dL – удлинение.

$$dV = s_1 L - s_0 L_0,$$

где s_i – площадь грани, L – длина образца после деформации, L_0 – длина образца до растяжения.

$$dL = 2dn,$$

где dn – элементарный путь перемещения вдоль нормали к поверхности.

Одномерное деформированное состояние конкретного образца эластомера однозначно можно характеризовать обобщенными параметрами f , λ , т. к. на L влияет ТКЛР. $f = F / s_0$ – условное напряжение, а $\lambda = 1 + \varepsilon$ – кратность растяжения или относительная длина $\lambda = L / L_0$, где L_0 – длина эластомера в недеформированном состоянии, зависящая от давления p и температуры T . Отсюда следует, что $dL = L_0 d\lambda + \lambda dL_0$. Таким образом, работа для одномерной деформации:

$$\delta A = pdV - V_0 f d\lambda - V_0 f \lambda \alpha dT + V_0 f \lambda k dp,$$

где $V_0 = s_0 L_0$ – удельный объем в недеформированном состоянии, $\alpha = L_0^{-1} (\partial L_0 / \partial T)_p$ – температурный коэффициент линейного расширения, $k = -L_0^{-1} (\partial L_0 / \partial p)_T$ – коэффициент «линейного» сжатия, относящиеся к недеформированному состоянию ($\lambda = 1$). Поэтому α и k это константы, не зависящие от λ [11].

В качестве материала проводников выбрано два материала: медь с коэффициентом Пуассона 0,35, модулем Юнга 128 ГПа, плотностью 8940 кг/м³ и золото с коэффициентом Пуассона 0,44, модулем Юнга 75,8 ГПа, плотностью 19300 кг/м³.

Результаты моделирования и их обсуждение

Для выбора наиболее подходящей формы проводников на эластичном основании было проведено моделирование одноосного растяжения подложек разной толщины при различных приложенных нагрузках для медных и золотых проводников различной формы. У подковообразных проводников наибольшие механические напряжения возникали в внутренних дугах верхнего и нижнего скруглений, у проводников треугольной формы – во внутренней части вершин, у проводников типа меандр – углах, места наибольших напряжений обозначены на рисунке 2.

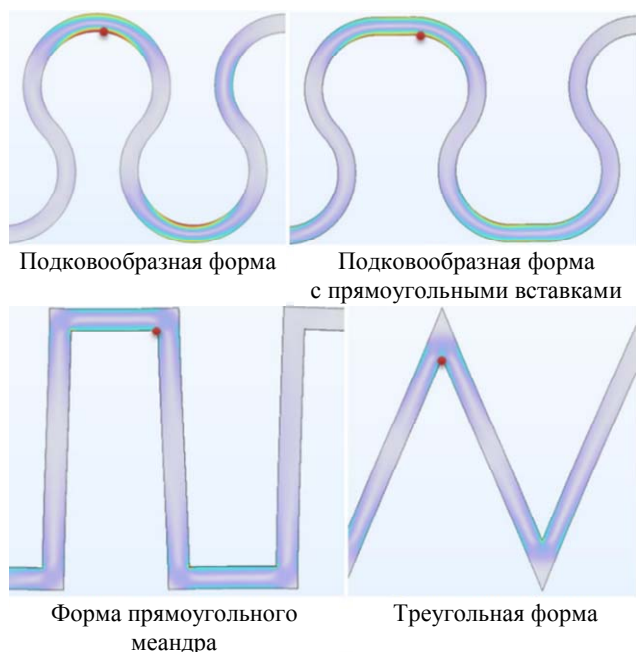


Рис. 2. Исследуемые формы проводников и места возникновения наибольших напряжений при растяжении

Во всех случаях возникающие напряжения при растяжении были меньше при меньшей толщине верхней части компаунда.

Чтобы уменьшить напряжения, возникающие в проводниках треугольной формы, некоторые из вершин были промоделированы скругленными. При длине проводника в нерастянутом состоянии 3,7 мм и амплитуде 1,3 мм в случае со скругленной вершиной напряжения были меньше в 1,6 раза, чем без скругления, в случае проводника с длиной 1,5 мм и амплитудой 0,64 мм напряжения при скруглении были больше в 1,05 раза. Польза скруглений зависит от размеров проводника и величины радиуса скругления.

При моделировании растяжения структуры с подковообразным проводником, имеющим прямоугольные вставки, увеличение длины прямого участка приводило к возрастанию максимальных механических напряжений.

Для следующих двух графиков выбраны формы медных (рис. 3) и золотых (рис. 4) проводников с наиболее похожими геометрическими параметрами эластичного основания. Отличаются амплитуда треугольного проводника (1,47 мм) и соответственно ширина подложки, длина измененного подковообразного проводника из-за длины прямоугольных вставок.

Из полученных зависимостей (рис. 3–4) можем наблюдать, что наименьшие напряжения возникают в подковообразном проводнике из-за равномерного распределения напряжений в дугах, как видно из рисунка 2. В случае проводника с прямоугольными вставками напряжения оказались выше из-за меньшего распределения и увеличения размеров компаунда, для того чтобы проводник поместился. Так, например, у проводника в форме прямоугольного треугольника с длиной 1,5 мм и амплитудой 0,64 мм максимальное напряжение меньше в 2,6 раза, чем у проводника в форме прямоугольного треугольника с длиной 3,7 мм и амплитудой 1,3 мм. Для медного и золотого проводника ситуации идентичны, отличаются лишь диапазоны максимальных возникающих напряжений.

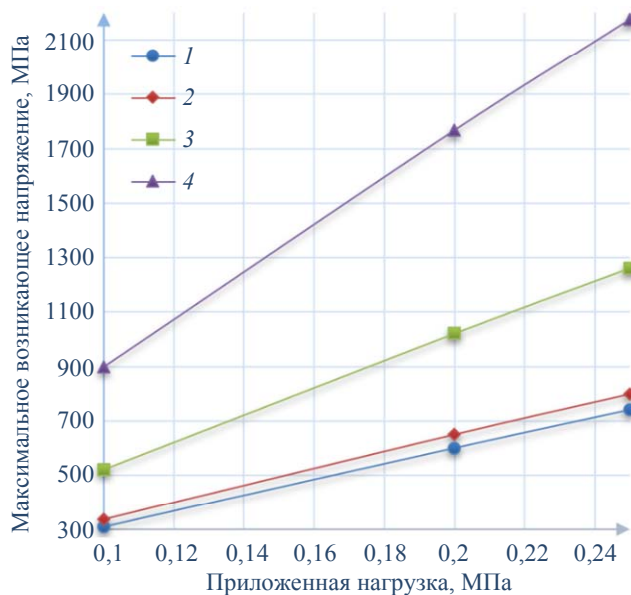


Рис. 3. Зависимость максимальных возникающих напряжений от приложенных нагрузок в медных проводниках разной формы: подковообразный (1), подковообразный с прямоугольными вставками (2), прямоугольный меандр (3) и треугольный (4)

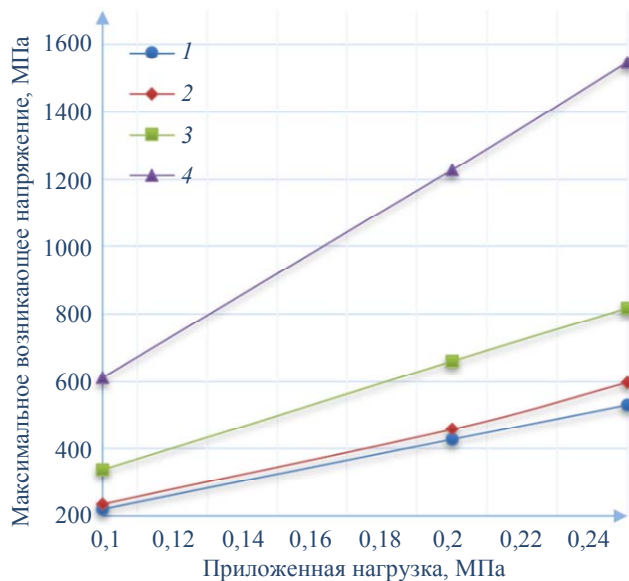


Рис. 4. Зависимость максимальных возникающих напряжений от приложенных нагрузок в золотых проводниках разной формы: подковообразный (1), подковообразный с прямоугольными вставками (2), прямоугольный меандр (3) и треугольный (4)

Заключение

В ходе исследования было рассмотрено влияние механических деформаций в конструкции эластичного носителя с проводниками из меди и золота различной формы. Лучший результат с точки зрения механической прочности с наименьшими возникающими напряжениями среди рассмотренных показал проводник подковообразной формы. Отсутствие углов, резких изгибов и плавность формы вдоль всего проводника позволяют максимально компенсировать приложенные нагрузки на растяжение.

Также хороший результат наблюдался при моделировании растяжения структуры с подковообразным проводником, имеющим прямоугольные вставки. Возникающие напряжения были на 10–20 % выше в зависимости от длины прямого участка, чем в подковообразном проводнике. Такая форма проводника может применяться при трассировке критичных сигналов, где требуется строго выдерживать зазор в меандре между сегментами $\geq 3w$ (ширина проводника) для минимизации перекрестных помех. В таком случае возможно будет целесообразно добавить небольшой прямой участок в месте изгиба, тем самым незначительно ухудшив прочностные характеристики конструкции, но выполнив требования целостности сигналов.

Худшие результаты были получены в проводнике треугольной формы. Добавление скруглений к вершине может уменьшить напряжения, но все равно сильно уступает другим формам.

Форма прямоугольного меандра также уступает подковообразной форме в плане механической надежности, но сильно меньше, чем треугольная, т. к. по 2-м вершинам растяжение распределяется более равномерно. Тем не менее выбор формы стоит остановить все равно на форме скругленного меандра без прямоугольных вставок или с их наличием при необходимости.

В данном исследовании не учитывались адгезия материалов друг к другу, пластичность металлов, а также их анизотропные и изотропные свойства. Дальнейшие исследования влияния механических деформаций в конструкции эластичного носителя с металлическими проводниками подковообразной формы планируется проводить с учетом влияния данных параметров и свойств материалов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-29-00959).

ЛИТЕРАТУРА

1. Brosteaux D., Axisa F., Gonzalez M., Vanfleteren J. / IEEE Electron Device Letters. 2007. Vol. 28. № 7. P. 552–554.
2. Горлов Н. С., Вертянов Д. В., Тимошенков С. П. Сборник трудов научно-практической конференции «Интеллектуальные системы и микросистемная техника». – Кабардино-Балкария: НИУ "МИЭТ", 2022. С. 112–118.
3. Jablonski M., Lucchini R., Bossuyt F. et al. / Microelectronics Reliability. 2014. Vol. 55. P. 143–154.
4. Gonzalez M., Axisa F., Bulcke M. V. et al. / Microelectronics Reliability. 2008. Vol. 48. P. 825–832.
5. Vanfleteren J., Bossuyt F., Axisa F. Stretchable Electronic Device. Патент на изобретение WO 086416. 2010.
6. Yuan Z., Kang J., Guan X. et al. Stretchable electronics and hybrid integration method for fabricating the same. Патент на изобретение WO 018255. 2020.
7. Jur J. S., Yokus M., Foote R. et al. Flexible interconnects, systems, and uses thereof. Патент на изобретение US 0358849. 2016.
8. Maghribi M. N., Krulevitch P. A., Davidson J. C. et al. Stretchable polymer-based electronic device. Патент на изобретение US 0243204. 2004.

9. Ponomarev N., Vertyanov D., Nikolaev V., Timoshenkov S. / IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. 2018. P. 1626–1628.

10. Verplancke R., Sterken T., Axisa F., Vanfleteren J. Development of a thin-film stretchable electrical in-

terconnection technology for biocompatible applications / Electronic System-Integration Technology Conference (ESTC). – 2010.

11. Бартнев Г. М., Зеленов Ю. В. Физика и механика полимеров. – М.: Высш. школа, 1983.

PACS: 81.40.Jj

Research of mechanical stresses in the substrate construction with metal conductors of different shapes

N. S. Gorlov, D. V. Vertyanov, S. P. Timoshenkov, R. N. Zhumagali and S. I. Gladkova

National Research University of Electronic Technology (MIET)

1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia

E-mail: gorlov.nikolai.s@mail.ru

Received 21.08.2023; revised 8.09.2023; accepted 19.09.2023

When forming stretchable interconnections, due to the non-plastic nature of metals, a special curved shape of conductors is required. This reduces the emerging stresses in the metal, which can lead to defects in the topology. The effect of mechanical deformations in the structure of a stretchable PDMS-based substrate with copper and gold conductors of different shapes was investigated. Based on the simulation results, the zones with maximum stresses where defects are most likely to occur under uniaxial tension for each type of conductor were determined. The effect of stretchable substrate thickness under different applied loads on mechanical stresses was determined as a function of conductor shape. The effect of rounding at the locations of the maximum stresses in the conductors was considered. The best conductor shape among the considered ones, which allows to compensate the applied loads of one-dimensional deformation to a greater extent, is determined.

Keywords: stretchable electronics, stretchable substrates, organosilicon compound, mechanical deformations, PDMS, horseshoe shape, wearable bioelectronics.

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-6-78-83

REFERENCES

1. Brosteaux D., Axisa F., Gonzalez M. and Vanfleteren J., IEEE Electron Device Letters **28** (7), 552–554 (2007).
2. Gorlov N. S., Vertyanov D. V. and Timoshenkov S. P., Elastic bases and interconnections in wearable bioelectronics and prospects for their application. Intelligent systems and microsystem technology: collection of scientific works-practical conference. Kabardino-Balkaria, MIET, 2022, pp. 112–118 [in Russian].
3. Jablonski M., Lucchini R., Bossuyt F. et al., Microelectronics Reliability **55**, 143–154 (2014).
4. Gonzalez M., Axisa F., Bulcke M. V. et al., Microelectronics Reliability **48**, 825–832 (2008).
5. Vanfleteren J., Bossuyt F. and Axisa F. Stretchable Electronic Device. Patent for invention WO 086416. 2010.
6. Yuan Z., Kang J., Guan X. et al. Stretchable electronics and hybrid integration method for fabricating the same. Patent for invention WO 018255. 2020.
7. Jur J. S., Yokus M., Foote R. et al. Flexible interconnects, systems, and uses thereof. Patent for invention US 0358849. 2016.
8. Maghribi M. N., Krulevitch P. A., Davidson J. C. et al. Stretchable polymer-based electronic device. Patent for invention US 0243204. 2004.
9. Ponomarev N., Vertyanov D., Nikolaev V. and Timoshenkov S. Research of the Constructions of Conductors on Flexible Carriers. IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. 2018, pp. 1626–1628.
10. Verplancke R., Sterken T., Axisa F. and Vanfleteren J. Development of a thin-film stretchable electrical interconnection technology for biocompatible applications. Electronic System-Integration Technology Conference (ESTC). 2010.
11. Bartenev G. M. and Zelenev Y. V., Physics and Mechanics of Polymers, Moscow, Higher School, 1983 [in Russian].