

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЕФОРМАЦИИ ПОПЕРЕЧНОГО ИЗГИБА НА КОНСТРУКЦИЮ ЭЛАСТИЧНОЙ ПОДЛОЖКИ С МЕДНЫМ ПРОВОДНИКОМ ПОДКОВООБРАЗНОЙ ФОРМЫ

Н.С. Горлов, аспирант

Д.В. Вертянов, канд. техн. наук

С.П. Тимошенко, д-р техн. наук

Р.Н. Жумагали, аспирант

С.И. Гладкова, бакалавр

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

(Россия, г. Москва)

DOI:10.24412/2500-1000-2023-12-1-7-14

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

Аннотация. Особенности создания эластичной электроники являются использование высокоэластичных материалов, таких как полидиметилсилоксан, и особой формы металлических проводников, способных выдерживать растяжение. Рассмотрено влияние механических деформаций поперечного изгиба в эластичном носителе с медными дорожками подковообразной формы с поддерживающим слоем из полиимида. Из результатов численного моделирования были определены максимальные значения механических напряжений в проводнике, величины смещений компаунда и проводника вдоль оси, имеющей обратное направление от приложенной силы, соответствующие картины распределения напряжений в проводнике и смещений в компаунде, а также наилучший вариант расположения полиимида относительно металла при одинаковом направлении изгибающей нагрузки. Проведено исследование адгезионных свойств нескольких кремнийорганических материалов.

Ключевые слова: эластичная электроника, эластичные носители, кремнийорганический компаунд, полидиметилсилоксан, полиимид, механическая деформация, изгиб, подковообразная форма, носимая биоэлектроника.

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. Такие устройства должны выдерживать деформации изгиба, растяжения, сжатия, сдвига, кручения. Увеличивается число исследований, связанных с эластичной электроникой, ведутся разработки новых способов и материалов для создания необходимой структуры [1-3]. Одним из применяемых материалов является полидиметилсилоксан – линейный кремнийорганический полимер, который помимо высокого относительного удлинения и прочности при разрыве, является биосовместимым, прозрачным, а так-

же совместим со многими технологическими процессами. Для обеспечения в эластичных электронных устройствах наилучшего растяжения при наименьших дефектах и разрывах электрического соединения наиболее широкое распространение получила подковообразная форма проводника [4-6]. Кремнийорганические материалы обладают очень низкой поверхностной адгезией и низким модулем упругости, по сравнению с металлами, что приводит к возникновению дефектов в проводнике и разрыву цепей [7]. Поэтому для улучшения адгезии с металлом применяются специальные буферные слои, например полиимид [4, 5, 8, 9].

Методика исследования и материалы

В программном обеспечении COMSOL Multiphysics было создано 2 варианта кон-

струкции эластичного носителя со следующими геометрическими параметрами: полидиметилсилоксан с толщиной 0,8 мм, длиной 5,5 мм и шириной 2,5 мм, внутри которого расположен медный проводник и

полиимид с толщинами 15 мкм и 7 мкм, соответственно (рис. 1). Общая ширина полиимида равна 200 мкм. Остальные параметры топологии металлической части конструкции приведены в таблице 1.

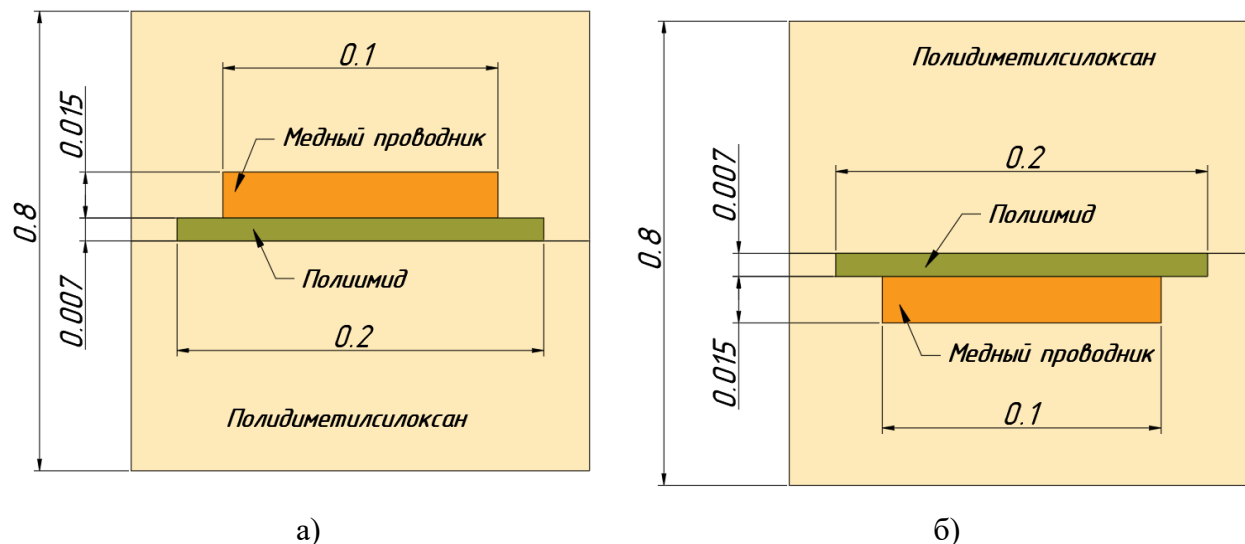


Рис. 1. Исследуемая конструкция эластичного носителя: медный проводник над полиимидом (а) и зеркальная ей (б)

Таблица 1. Геометрические параметры проводника

Параметр	Значение
Амплитуда, мм	1,3
Внутренний радиус скругления, мм	0,3
Внешний радиус скругления, мм	0,4
Ширина, мм	0,1
Минимальный зазор между сегментами, мм	0,19
Период, мм	1

Свойства полидиметилсилоксана (Sylgard 184, Dow Corning), меди и полиимида приведены в таблице 2.

Таблица 2. Свойства материалов

Параметр	Полидиметилсилоксан	Полиимид	Медь
Плотность, кг/м ³	1030	1300	8940
Модуль упругости, МПа	1,5	3100	128000
Коэффициент Пуассона	0,495	0,34	0,35

Методика численного моделирования заключается в фиксации двух боковых граней эластичного носителя и приложение возрастающей с течением времени

нагрузки от 0 до 0,25 Н с шагом 0,05 Н. На рисунке 2 показана область приложения силы шириной 300 мкм.

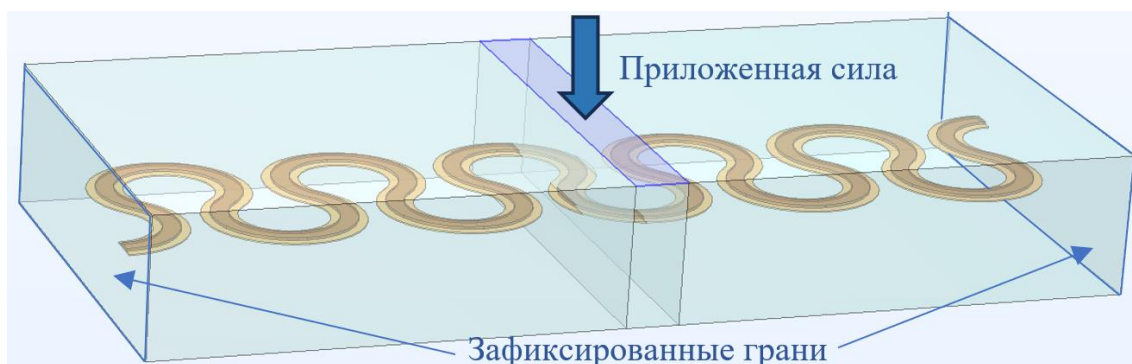


Рис. 2. Закрепленные грани и область приложения силы

Также было проведено исследование адгезионных свойств четырех кремнийорганических материалов, подходящих для формирования конструкции эластичного носителя. Свойства материалов приведены в таблице 3. Хорошая адгезия между ме-

таллическим проводником и компаундом влияет на надежность конструкции, т.к. отслаивание проводника может привести к его разрыву и потере электрического контакта.

Таблица 3. Свойства материалов

Параметр	Универсал	СИЭЛ 159-322А	Смартсил СТ-501	Смартсил СТ-503
Прочность на растяжение, МПа	5,7	1,68	3,9	4,8
Относительное удлинение при разрыве, %	85	110	160	122
Вязкость динамическая, мПа•с	100	5000	5200	4300
Соотношение компонентов при смешивании	100:3	10:1	1:1	1:1
Режим отверждения	3 часа при 100°C	1 час при 150°C	3 часа при 100°C	3 часа при 100°C

На предварительно очищенные заготовки фольгированного стеклотекстолита FR4 были нанесены смешанные с отвердителем кремнийорганические материалы, произведена дегазация до достижения давления 0,095 МПа на вакуумной системе MM-V9/VALUE VE 115N и затем проведено отверждение в сушильном шкафу в соответствии с режимом для каждого материа-

ла. Далее образцы закреплялись по периметру прижимными пластинами и с помощью динамометра PCE FM 50 постепенно прикладывалась нарастающая сила, необходимая для отслаивания компаунда от меди (рис. 3). Фиксируется максимальное значение приложенной силы в момент отрыва.

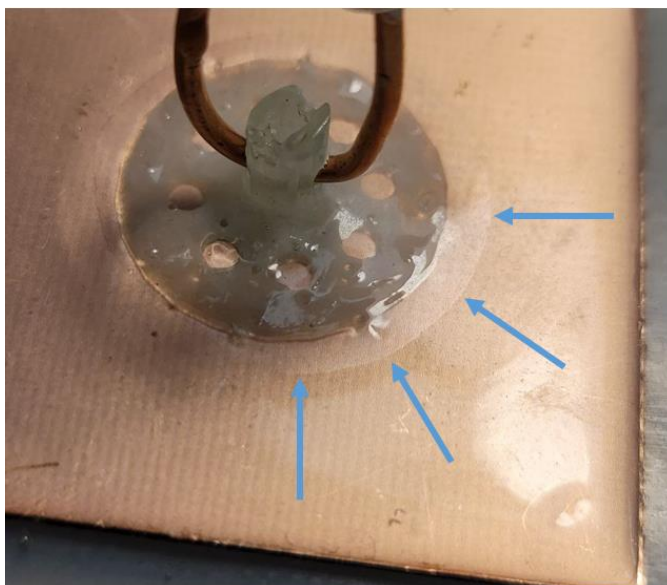


Рис. 3. Отслаивание компаунда от меди

Результаты моделирования и их обсуждение

Было проведено моделирование влияния деформации поперечного изгиба на 2 вида конструкции эластичной подложки с медным проводником и буферным слоем

полиимида. Результаты максимальных возникающих напряжений для обоих случаев приведены на рисунке 4. Можно наблюдать, что напряжения выше во втором случае, когда нагрузка прикладывается со стороны полиимида.

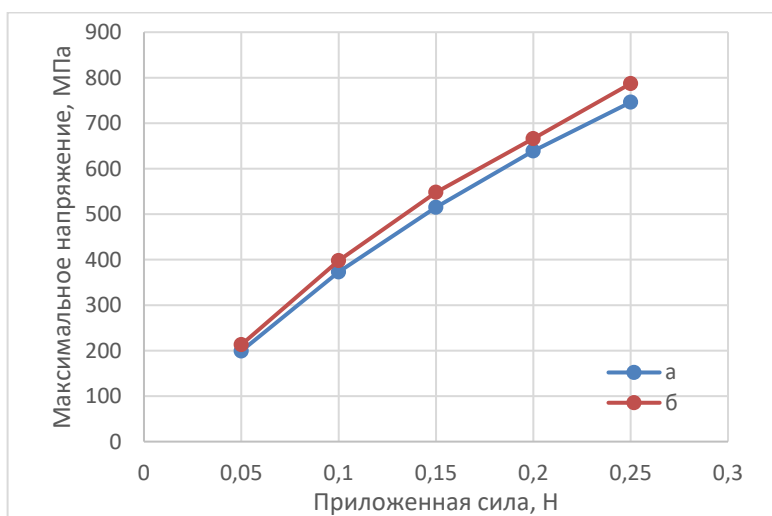


Рис. 4. Зависимость максимальных напряжений в проводнике от приложенной силы со стороны проводника (а) и со стороны полиимида (б)

В обоих случаях наблюдалось похожее распределение механических напряжений. Их максимальные значения возникали в центре эластичного носителя во внутренней части скругления нижней подковы, расположенной дальше от области приложенной силы. На рисунке 5 приведена кар-

тина распределения напряжений в проводнике с точками максимума 193 МПа и минимума около 1 МПа для первого случая при приложенной нагрузке 0,05 Н. Для наглядности также показаны контуры всей конструкции с меньшим значением изгиба.

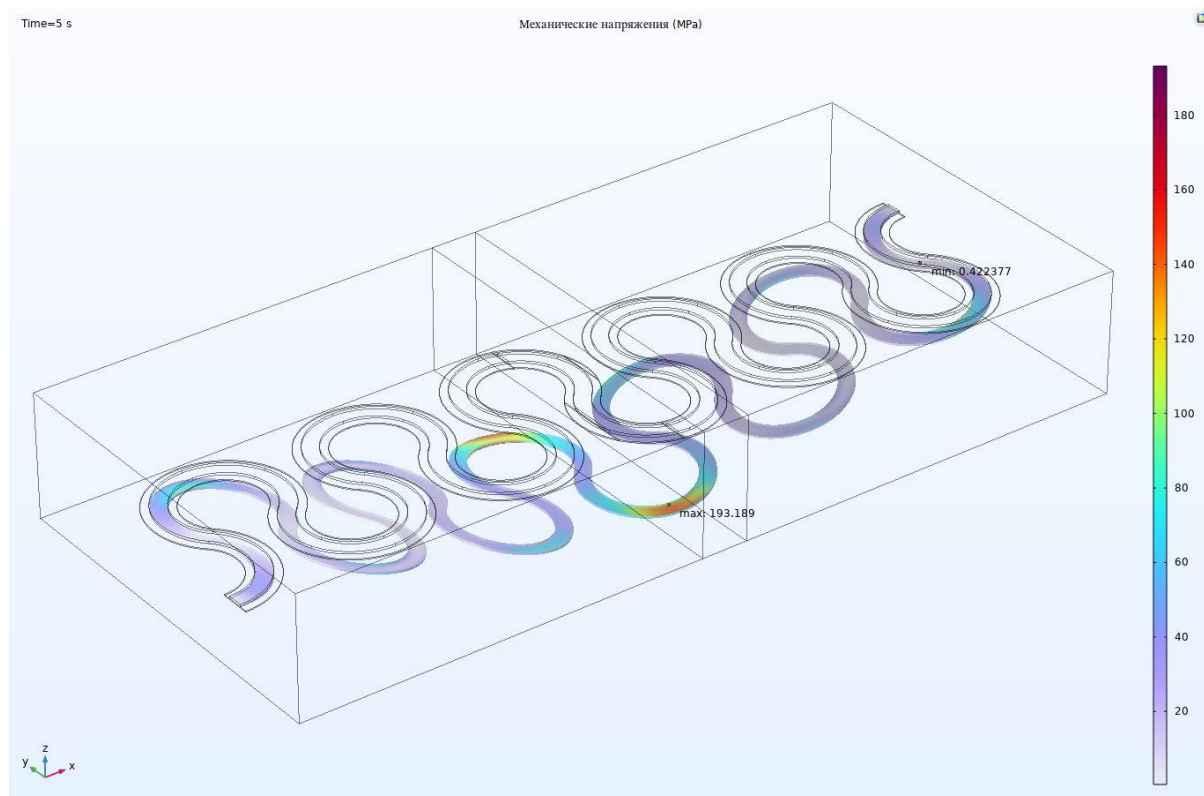


Рис. 5. Распределение напряжений в проводнике (МПа)

Максимальное смещение верхней точки компаунда в зависимости от приложенной нагрузки для первого случая находилось в

диапазоне 40-137% толщины эластичного носителя, а для второго 40-131% соответственно (рис. 6).

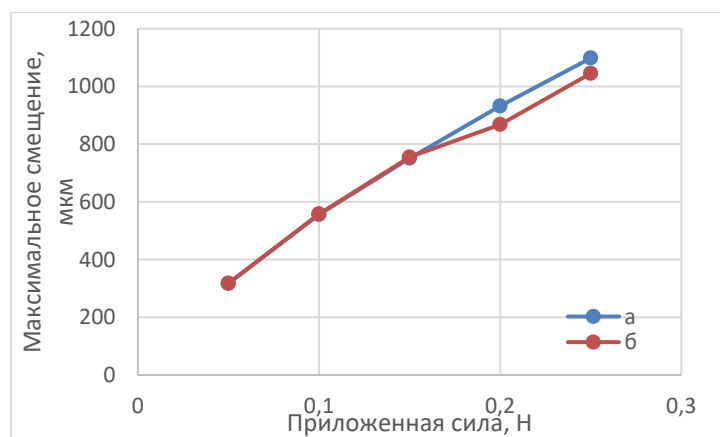


Рис. 6. Максимальные смещения в компаунде от приложенной силы со стороны медного проводника (а) и со стороны полиимида (б)

На рисунке 7 приведена картина распределения перемещений компаунда с цветовой шкалой относительно координаты Z для варианта, где медь находится

сверху при той же приложенной силе 0,05 Н. Максимальное смещение в 317 мкм достигается в центре эластичного носителя, где прикладывается нагрузка.

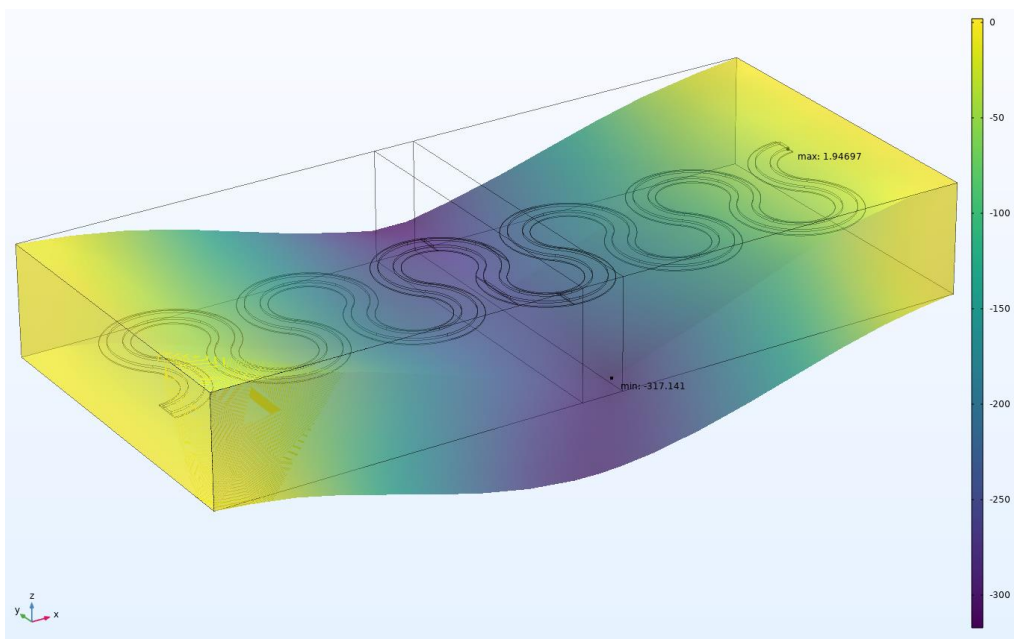


Рис. 7. Распределение смещения компаунда по оси Z (мкм)

Зависимость максимального смещения проводника от приложенной силы (рис. 8) имеет сходство с аналогичной зависимостью для компаунда (рис. 6). Смещение проводника по оси Z для двух видов кон-

струкции меньше, чем у компаунда, что обусловлено значительно большей разницей модуля упругости полидиметилсилоксана и меди.

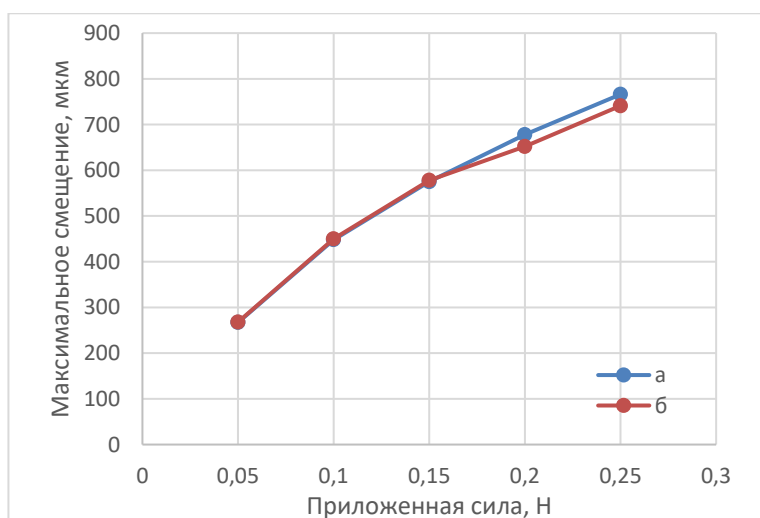


Рис. 8. Максимальные смещения в проводнике от приложенной силы со стороны медного проводника (а) и со стороны полиимида (б)

Результаты измерений силы, необходимой для отслаивания компаундов от меди приведены в таблице 4.

Таблица 4. Результаты измерений отрыва компаундов от медной фольги

Компаунд	Приложенная сила, Н
Универсал	37,1
СИЭЛ 159-322А	59,36
Смартсил СТ-501	19,14
Смартсил СТ-503	38

Компаунд СИЭЛ 159-322А показал лучший результат по сопротивлению к отслаиванию от меди среди рассмотренных компаундов, что может позволить формировать с его помощью эластичные носители без использования дополнительного буферного слоя полиимида для улучшения адгезии между медью и кремнийорганическими материалами. Но при этом он обладает более низкой прочностью на растяжение, что может ограничить возможность его использования в качестве подложки для устройств, подверженных повышенным механическим деформациям.

Заключение

В данном исследовании было рассмотрено влияние механических деформаций при поперечном изгибе на два варианта конструкции эластичного носителя. В варианте, где нагрузка прикладывалась со

стороны медного проводника, возникали меньшие механические напряжения при любой заданной силе по сравнению с случаем, где нагрузка прикладывалась со стороны полиимида. Поэтому данный вариант является более предпочтительным при проектировании конструкции, если заранее известно, как предполагается использовать устройство с эластичной подложкой и в какую сторону может происходить изгиб конструкции.

Также были определены необходимые нагрузки для отрыва подложки из кремнийорганического материала от меди. В дальнейших исследованиях планируется определить влияние внедрения дополнительных буферных для улучшения адгезии и укрепления металлизации на эластичном носителе.

Библиографический список

- 1 Pan X., Xu Z., Bao R. Research Progress in Stretchable Circuits: Materials, Methods, and Applications // *Advanced Sensor Research* July 2023. Pp. 1-15.
2. Lv J., Thangavel G., P. See Lee. Reliability of printed stretchable electronics based on nano/micro materials for practical applications - *Nanoscale* (RSC Publishing). – 2023. – № 15. – Pp. 434-449.
3. Lee J., Cho H., Yoon H., Kang H. Advancements in Electronic Materials and Devices for Stretchable Displays // *Advanced Materials Technologies*. – 2023. – Pp. 1-37.
4. Axisa F., Bossuyt F. Laser based fast prototyping methodology of producing stretchable and conformable electronic systems. // *Conference: Electronics System-Integration Technology Conference, 2008. ESTC 2008*.
5. Frederick Bossuyt, Thomas Vervust, Fabrice Axisa and Jan Vanfleteren, *Improved Stretchable Electronics Technology for Large Area Applications*, UGent/CMST/IMEC, Zwijnaarde, Belgium, 2010.
6. Jentoft L., Tenzer Yar. Flexible, stretchable tactile arrays from MEMS barometers // *16th International Conference on Advanced Robotics (ICAR)* – 2013.
7. Development of a thin-film stretchable electrical interconnection technology for biocompatible applications / R. Verplancke, T. Sterken, F. Axisa, J. Vanfleteren // *Electronic System-Integration Technology Conference (ESTC)*. 2010.
8. Verplancke R., Bossuyt F., Cuypers D. and Vanfleteren J. Thin-film stretchable electronics technology based on meandering interconnections: fabrication and mechanical performance, Centre for Microsystems Technology (CMST), ELIS Department, Ghent University-IMEC, 2011.
9. Lahcen A., Caprio A., Hsue W. Creating Stretchable Electronics from Dual Layer Flex-PCB for Soft Robotic Cardiac Mapping Catheters // *Micromachines*. – 2023. – №14(4). – P. 884.

**INVESTIGATION OF THE EFFECT OF TRANSVERSE BENDING DEFORMATION
ON THE DESIGN OF AN ELASTIC SUBSTRATE WITH A HORSESHOE-SHAPED
COPPER CONDUCTOR**

N.S. Gorlov, *Postgraduate Student*

D.V. Vertyanov, *Candidate of Technical Sciences*

S.P. Timoshenkov, *Doctor of Technical Sciences*

R.N. Zhumagali, *Postgraduate Student*

S.I. Gladkova, *Bachelor*

National Research University "MIET"

(Russia, Moscow)

Abstract. *Features of creating elastic electronics are the use of highly elastic materials, such as polydimethylsiloxane, and a special form of metal conductors that can withstand stretching. The influence of mechanical deformations of transverse bending in an elastic carrier with horseshoe-shaped copper tracks with a supporting layer of polyimide is considered. From the results of numerical modeling, the maximum values of mechanical stresses in the conductor, the displacement values of the compound and the conductor along the axis having the opposite direction from the applied force, the corresponding patterns of stress distribution in the conductor and displacements in the compound, as well as the best option for the location of the polyimide relative to the metal in the same direction were determined bending load. A study of the adhesive properties of several organosilicon materials was carried out.*

Keywords: *elastic electronics, elastic media, silicone compound, polydimethylsiloxane, polyimide, mechanical deformation, bending, horseshoe shape, wearable bioelectronics.*