

УДК 539.371
EDN: LZMGЕК

PACS: 81.40.Jj

Исследование влияния механических деформаций на шлейф жестко-эластичной печатной платы

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

При разработке устройств носимой биоэлектроники с эластичными элементами необходимо подтвердить высокую устойчивость конструкции коммутационного носителя к различным механическим воздействиям. В работе исследовано влияние деформаций растяжения, сжатия и изгиба на шлейф с проводниками подковообразной формы в жестко-эластичной печатной плате. В результате моделирования определены области максимальных механических напряжений в зависимости от приложенной силы. Выявлено, что увеличение ширины дорожек буферного слоя из полиимида способствует большей надежности эластичной части при растяжении. Так, при ширине полиимидных дорожек 150/750 мкм относительно медных 100/500 мкм получены результаты возможного растяжения шлейфа более 20 %, изгиба со смещением вниз более 15 % относительно длины шлейфа и сжатия более 17 % без замыкания соседних цепей между собой. Определено, что для обеспечения повышенной устойчивости к механическим воздействиям необходимы зазоры между соседними проводниками более 100 мкм, а также топологии от края компаунда не менее 2 мм.

Ключевые слова: эластичный шлейф, жестко-эластичная плата, кремнийорганический компаунд, механические деформации, растяжение, сжатие, изгиб, полидиметилсилоксан, полиимид, подковообразная форма, носимая биоэлектроника.

DOI: 10.51368/1996-0948-2024-5-86-92

Введение

Предлагаемая публикация является продолжением научной работы [1], в которой по-

казана эффективность использования в носимой биоэлектронике жестко-эластичных печатных плат с проводниками подковообразной формы. Главными преимуществами являются их способности выдерживать сжатия, изгибы скручивания, сдвиги и повторять форму поверхности закрепления.

Одним из вариантов применения эластичных носителей являются шлейфы в жестко-эластичных печатных платах [2–5].

Конструкция рассматриваемых изделий состоит из одной и более жестких частей, плат, соединенных между собой конструктивными эластичными элементами с расположенными на них проводниками, имеющими специальную форму, компенсирующую деформацию при внешнем силовом воздействии.

Из-за большой разницы в модулях упругости между металлическими дорожками и эластичным материалом возникают разрывы в

Горлов Николай Сергеевич, аспирант.
E-mail: gorlov.nikolai.s@mail.ru
Вертянов Денис Васильевич, к.т.н.
Тимошенко Сергей Петрович, д.т.н.
Жумагали Райымбек Нуржанулы, аспирант.
Гладкова Светлана Игоревна, студент.
Гаврилова Анна Александровна, студент.
Национальный исследовательский университет
«МИЭТ».
Россия, 124498, Москва, г. Зеленоград,
площадь Шокина, 1.

Статья поступила в редакцию 4.06.2024

После доработки 2.07.2024

Принята к публикации 23.07.2024

Шифр научной специальности: 2.2.3

© Горлов Н. С., Вертянов Д. В., Тимошенко С. П.,
Жумагали Р. Н., Гладкова С. И., Гаврилова А. А., 2024

проводниках, поэтому для обеспечения целостности сигналов применяют особые формы проводников, чаще всего – подковообразную [1, 3–8].

В качестве буферного слоя для обеспечения лучшей адгезии между проводниками и полидиметилсилоксаном и снижения механических напряжений в жестких участках при деформациях, а также создания необходимого ограничения растяжимости для сохранения работоспособности устройства используются полиимиды: полиимид с фольгой Cirlex (Dupont) с модулем упругости 1,8–2,3 ГПа и относительным удлинением 56–65 %, фоточувствительный полиимид HD4100 (HD Microsystems) с модулем упругости 3,4 ГПа и относительным удлинением 45 % [3, 6–8].

В данной работе рассматриваются основные виды механических деформаций растяжение, сжатие и изгиб шлейфа с подковообразной топологией медных дорожек и промежуточного полиимидного слоя между ними в конструкции жестко-эластичной печатной платы. Деформация при кручении шлейфа, а также комбинированные варианты этих механических воздействий будут представлены в дальнейших работах.

Методика исследования и материалы

В качестве объекта компьютерного исследования выбрана модель жестко-эластичной печатной платы, состоящая из

двух жестких участков и эластичного шлейфа, соединяющего их (рис. 1). Жесткие участки сформированы на стеклотекстолите FR4 с габаритами 29×29×0,515 мм.

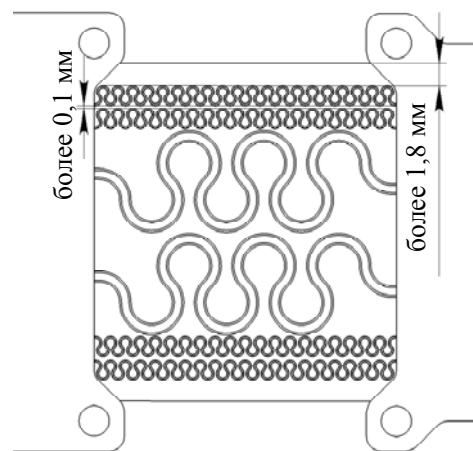


Рис. 1. Фрагмент конструкции жестко-эластичной платы

Эластичный участок представляет собой шлейф с медными и полиимидными дорожками толщиной 25 мкм, закрытые с двух сторон слоем эластичного компаунда (рис. 2). В качестве компаунда выбран полидиметилсилоксан — высокопластичный, биологически инертный и оптически прозрачный материал, подходящий для применения в носимой биоэлектронике.

Геометрические параметры подковообразных проводников в структуре эластичного шлейфа, представлены на рисунке 3 и таблице 1.

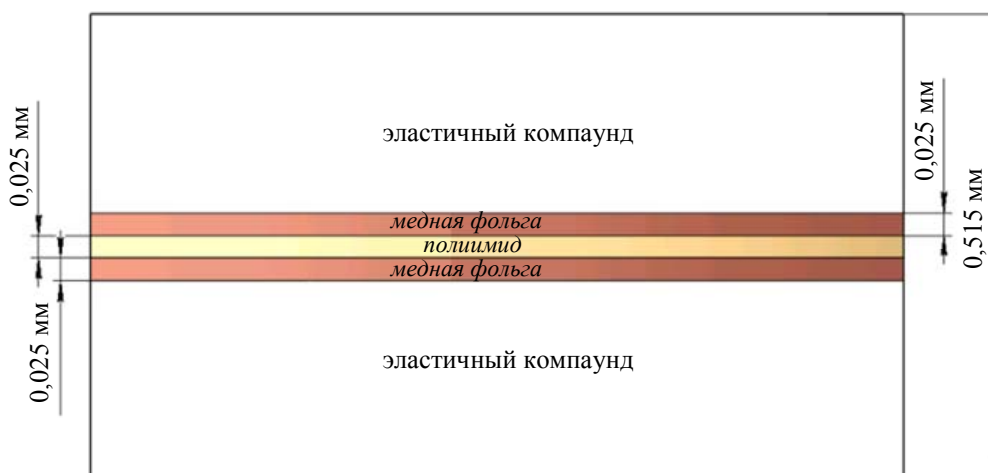


Рис. 2. Структура эластичного шлейфа

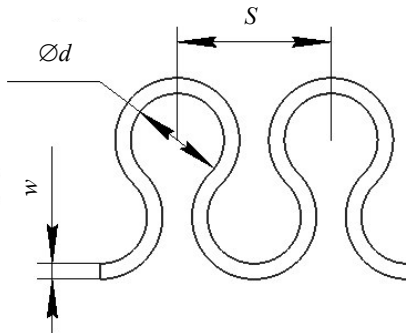


Рис. 3. Геометрические параметры подковообразных дорожек

Таблица 1

Геометрические параметры подковообразных проводников

Параметр	Медь	Полиимид
Диаметр (d), мм	0,6; 3	0,58; 2,9; 0,55; 2,75
Ширина (w), мм	0,1; 0,5	0,12; 0,6; 0,15; 0,75
Шаг (s), мм	1; 5	

В САЕ системе мультифизического анализа COMSOL Multiphysics проводилось моделирование данной жестко-эластичной платы с зазорами между проводниками более 100 мкм и между крайними проводниками и компаундом более 1,8 мм.

Математическое моделирование проводилось на основе решения стационарного уравнения равновесия твердотельного тела [9]:

$$\nabla(FS)^T + F_v = 0, \tag{1}$$

где S – второй тензор напряжений Пиолы-Кирхгофа, F_v – сила, приходящаяся на единицу объема деформированного тела, F – градиент деформации, вычисляемый по уравнению [9]:

$$F = I + \nabla u, \tag{2}$$

где I – единичный тензор, ∇u – градиент смещения.

Свойства материалов, используемые для моделирования, приведены в таблице 2. Для расчетов использовались типовые усредненные значения материалов.

При растяжении одна плата была полностью закреплена, а к другой приложена нагрузка в положительном направлении оси X. При сжатии заданы те же условия, но сила задана в противоположную сторону. Для осуществления изгиба приложена нагрузка к верхней плоскости эластичной части вниз по оси Z при фиксации обеих плат.

Таблица 2

Свойства материалов

Параметр	Полидиметил-силоксан	Полиимид	Медь	FR4
Плотность, кг/м ³	1030	1300	8940	1900
Модуль упругости, МПа	1,5	3100	128000	22000
Коэффициент Пуассона	0,495	0,34	0,35	0,15

Результаты моделирования и их обсуждение

В случае моделирования растяжения жестко-эластичной платы при приложенной силе 25 Н удлинение эластичной части составило 18 %. При приложенной нагрузке 30 Н

поперечное сужение эластичной структуры в результате растяжения приводит к замыканию проводников между собой. От приложенной силы на растяжение зависит не только удлинение по оси X, но и смещение по осям Y и Z, а также области максимальных возникающих напряжений в проводниках (табл. 3, рис. 4).

Таблица 3

Результаты растяжения эластичной структуры

Приложенная сила, Н	Удлинение по оси X, %	Максимальные смещения по осям, мм		Максимальные напряжения, МПа	Области максимальных напряжений (рис. 4)
		Y	Z		
5	6	0,23	0,03	919	5
10	10	0,4	0,16	1762	5
15	13	0,52	0,1	2961	1
20	16	0,67	0,88	3435	2
25	18	0,81	0,63	7577	3
30	19	1,07	0,62	8590	4

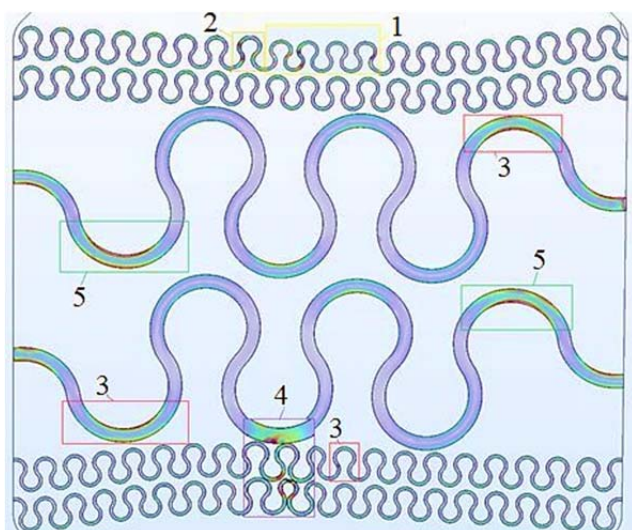


Рис. 4. Области основных механических напряжений в проводниках при растяжении

Большие механические напряжения, помимо мест соединения проводников с жесткой частью, возникают в широких дорожках цепей земли и питания. При силе выше 10 Н поперечное сужение эластичной части оказывает сильное влияние на проводящие линии по краям, в особенности на «подковы» в центральной части шлейфа.

По оси Z происходили смещения в плате, к которой прикладывалась нагрузка. Так при 5 Н плата опускалась на 0,03 мм ниже по сравнению с исходным положением, а при 10–30 Н плата поднималась до 0,88 мм.

В случае моделирования сжатия жестко-эластичной платы при нагрузке 10 Н эластичный шлейф сжимался на 17 % и наблюдалась следующее распределение механических

напряжений, показанное на рисунке 5. В таблице 4 представлены результаты с максимальными механическими напряжениями и максимальными перемещениями шлейфа по трем осям при сжатии.

При 15 Н происходит смыкание «подков» во всех цепях. Максимальные механические напряжения при сжатии, помимо мест соединения шлейфа с жесткой частью, происходят в цепях земли и питания в «подковах», близких к жестким частям.

Поперечное растяжение эластичного носителя и области максимальных деформаций по оси Y при сжатии аналогичны результатам, полученным при растяжении структуры. При сжатии плата, на которую воздействовала сила, поднималась по оси Z до 4,92 мм.

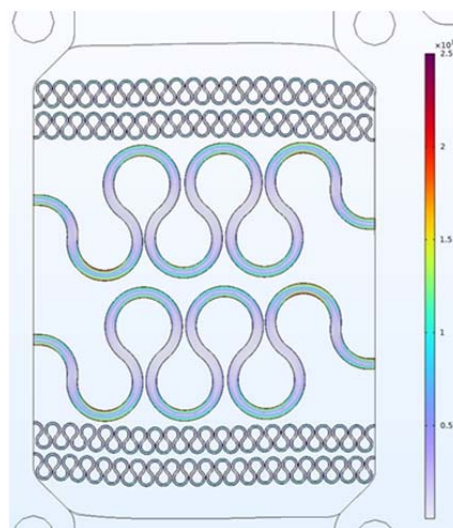


Рис. 5. Распределение механических напряжений в проводниках при сжатии с нагрузкой 10 Н

Таблица 4

Результаты сжатия эластичной структуры

Приложенная сила, Н	Сжатие по оси X, %	Максимальное перемещение по оси Y, мм	Максимальное перемещение по оси Z, мм	Максимальные напряжения, МПа
5	10	0,26	3,76	1182
10	17	0,44	2,43	2210
15	24	0,53	4,92	2910

В случае моделирования изгиба жестко-эластичной платы при нагрузке 5 и 10 Н по оси Z вниз максимальные напряжения наблюдались в местах соединения проводящих линий с платами (рис. 6). В таблице 5 приведены

значения механических деформаций и максимальных смещений по трем осям.

В процессе изгиба происходило небольшое поперечное сужение шлейфа (до 2 %) и растягивание эластичной части вниз (до 3,1 мм).

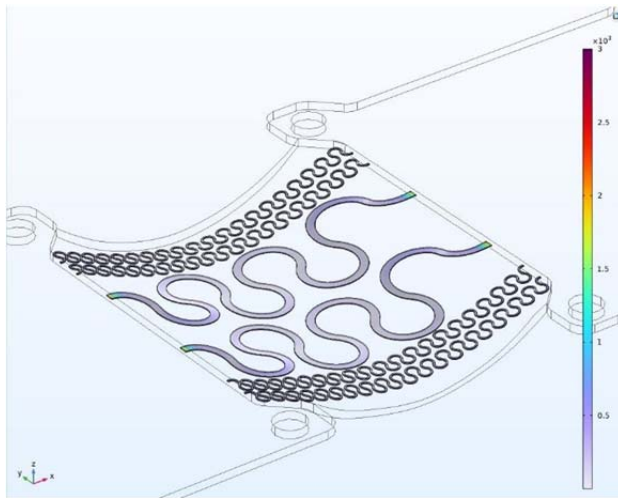


Рис. 6. Распределение механических напряжений в проводниках при изгибе с нагрузкой 15 Н

Таблица 5

Результаты изгиба эластичной структуры

Приложенная сила, Н	Максимальное перемещение по оси X, мм	Максимальное перемещение по оси Y, мм	Максимальное перемещение по оси Z, мм	Максимальные напряжения, МПа
5	0,11	0,09	1,74	1443
10	0,26	0,25	3,1	3307

Для повышения устойчивости к механическим деформациям выше 17 % при растяжении и сжатии ширина полиимидных дорожек была увеличена до 150 мкм и 750 мкм. В результате при 30 Н удалось добиться рас-

тяжения 20 % при максимальном напряжении 6799 МПа без замыкания цепей между собой (рис. 7). Увеличение ширины подковообразных линий из полиимида способствует большей надежности эластичной части при растяжении.

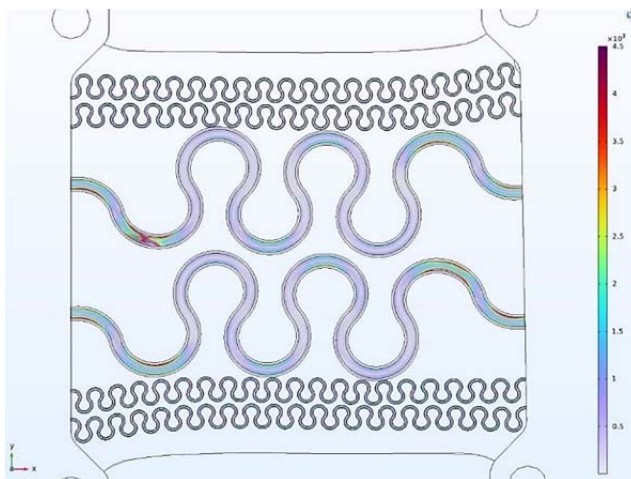


Рис. 7. Распределение механических напряжений в проводниках при растяжении с нагрузкой 30 Н и увеличенной шириной полиимидных дорожек

На рисунке 8 приведен график зависимости удлинения от приложенной силы для сжатия и растяжения шлейфа на основе приведенных данных в таблицах 3 и 4. На графике также показаны минимальные зазоры между проводниками подковообразной формы из фольгированного полиимида.

По данным кривым на рисунке 8 построены аппроксимирующие функции для сжатия –

формула 3 и растяжения – формула 4 с величинами достоверности 0,999.

$$L = -0,004 \cdot F^3 + 0,12 \cdot F^2 - 2,5 \cdot F, \tag{3}$$

$$L = 0,0002 \cdot F^3 - 0,0267 \cdot F^2 + 1,2325 \cdot F + 0,1429, \tag{4}$$

где L – удлинение %, а F – приложенная сила, Н.

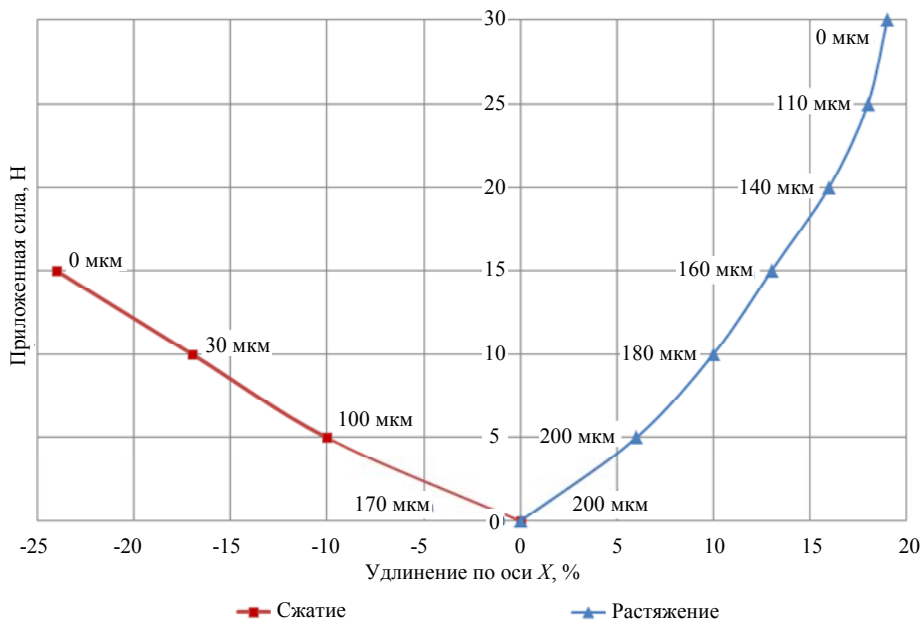


Рис. 8. Зависимость удлинения от приложенной силы для сжатия и растяжения эластичной структуры с указанными минимальными зазорами между подковообразными проводниками с буферным слоем той же формы из полиимида шириной 120 мкм

Заключение

В ходе работы были исследованы воздействия механических деформаций на эластичный шлейф с многослойными подковообразными проводниками между жесткими платами.

Выявлено, что при растяжении с нагрузкой до 10 Н максимальные механические напряжения возникают в местах соединения проводников с жесткой частью и в широких дорожках цепей земли и питания, а при силе выше 10 Н из-за более сильного влияния поперечного сужения эластичного компаунда – в «подковах» посередине проводящих линий по краям. Лучший результат, при котором достигнуто растяжение более 20 %, получен при увеличении ширины полиимидных дорожек до 150 и 750 мкм.

При сжатии максимальные механические напряжения возникают в местах соединения с жесткой частью и в больших проводниках в «подковах», близких к жестким частям. По результатам моделирования возможно сжатие эластичной части более 17 %.

При сжатии и растяжении значения максимальных смещений по оси Y в компаунде находились в одних и тех точках.

При изгибе шлейфа максимальные механические напряжения возникают в местах соединения с жесткой частью. Значение растяжения эластичной части вниз более 3,1 мм.

Установлено, что при разработке конструкции жестко-эластичной печатной платы

на основе данных расчетов необходимо предусмотреть зазоры между проводниками более 100 мкм и между крайними проводниками и компаундом – не менее 2 мм для обеспечения повышенной устойчивости к механическим воздействиям.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Горлов Н. С., Вертянов Д. В., Тимошенко С. П. и др. / Прикладная физика. 2023. № 6. С. 78–83.
2. Kawabata R., Araki T., Akiyama M. et al. / Flexible and Printed Electronics. 2022. Vol. 7. P. 1–10.
3. Axisa F., Bossuyt F., Vervust T. et al. Laser based fast prototyping methodology of producing stretchable and conformable electronic systems / 2nd Electronics System-Integration Technology Conference. 2008. P. 1387–1390.
4. Park J. S., Kim W. S. Sustained percolation in stretched silver nanowire networks for stretchable interconnection applications / Materials Research Society Symposia Proceedings. 2014. Vol. 1685.
5. Bossuyt F., Vervust T., Vanfleteren J. / IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. 2013. Vol. 3. № 2. P. 229–235.
6. Jentoft L., Tenzer Y., Vogt D. et al. Flexible, stretchable tactile arrays from MEMS barometers / 16th International Conference on Advanced Robotics (ICAR). 2013. P. 1–6.
7. Bossuyt F., Vervust T., Axisa F. et al. A new low cost, elastic and conformable electronics technology for soft and stretchable electronic devices by use of a stretchable substrate / European Microelectronics and Packaging Conference. 2009. P. 1–6.

8. Verplancke R., Bossuyt F., Cuyper D. et al. / Journal of Micromechanics and Microengineering. 2011. Vol. 22. P. 015002.

9. Темам Р., Миранвиль А. Математическое моделирование в механике сплошных сред. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014.

PACS: 81.40.Jj

Research of the effect of mechanical deformations on the cable of a rigid-stretchable PCB

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

National Research University of Electronic Technology (MIET)
1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia
E-mail: gorlov.nikolai.s@mail.ru

Received 4.06.2024; revised 2.07.2024; accepted 23.07.2024

In the process of designing reliable stretchable electronics devices, it is necessary for the elastic substrate to have increased resistance to mechanical effects. The effect of tensile, compressive, and bending deformations on a cable with horseshoe-shaped conductors in a rigid-stretchable PCB was investigated. As a result of modeling, the areas of maximum mechanical stresses as a function of the applied force were determined. It is revealed that the increase in the width of polyimide buffer layer tracks contributes to greater reliability of the stretchable part under tension. Thus, with the width of polyimide tracks 150/750 microns relative to copper tracks 100/500 microns, the results of possible stretching of the cable more than 20 %, bending with downward displacement more than 15 % relative to the length of the cable and compression more than 17 % without short-circuiting of neighboring tracks were obtained. It was determined that to provide increased resistance to mechanical effects, clearances between neighboring conductors of more than 100 μm are required, as well as topologies from the edge of the compound not less than 2 mm.

Keywords: stretchable cable, rigid-stretchable PCB, organosilicon compound, mechanical deformations, stretching, compression, bending, PDMS, polyimide, horseshoe shape, wearable bioelectronics.

REFERENCES

- Gorlov N. S., Vertyanov D. V., Timoshenkov S. P. et al., Applied Physics, № 6, 78–83 (2023) [in Russian].
- Kawabata R., Araki T., Akiyama M. et al., Flexible and Printed Electronics 7, 1–10 (2022).
- Axisa F., Bossuyt F., Vervust T. et al. Laser based fast prototyping methodology of producing stretchable and conformable electronic systems. 2nd Electronics System-Integration Technology Conference. 2008, pp. 1387–1390.
- Park J. S. and Kim W. S. Sustained percolation in stretched silver nanowire networks for stretchable interconnection applications. Materials Research Society Symposia Proceedings 1685 (2014).
- Bossuyt F., Vervust T. and Vanfleteren J., IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology 3 (2), 229–235 (2013).
- Jentoft L., Tenzer Y., Vogt D. et al. Flexible, stretchable tactile arrays from MEMS barometers. 16th International Conference on Advanced Robotics (ICAR). 2013, pp. 1–6.
- Bossuyt F., Vervust T., Axisa F. et al. A new low cost, elastic and conformable electronics technology for soft and stretchable electronic devices by use of a stretchable substrate. European Microelectronics and Packaging Conference. 2009, pp. 1–6.
- Verplancke R., Bossuyt F., Cuyper D. et al., Journal of Micromechanics and Microengineering 22, 015002 (2011).
- Temam R. and Miranville A., Mathematical Modeling in Continuum Mechanics, New York, Cambridge University Press, 2005.