

## ПОЛИМЕРНЫЕ ДАТЧИКИ ДЕФОРМАЦИИ ДЛЯ РОБОТОТЕХНИКИ

*Лоцицкая А.В., Род В.А., Варакина С.В., Кондратов А.П.*

*Московский политехнический университет, Москва*

**Ключевые слова:** датчик деформации, графит, электрическая проводимость, электросопротивление, деформационная тензочувствительность.

**Аннотация.** Исследованы электрические и механические свойства датчиков из полимеров с покрытием дисперсией графита, предназначенных для изготовления сенсорных устройств, применяемых в робототехнике и «носимой электронике». Установлено различие деформационной и тензочувствительности датчиков на основе полимерных пленок и тканей при малых и значительных деформациях. Получены образцы датчиков с деформационной и тензочувствительностью превышающей известные значения.

## POLYMER STRAIN SENSORS FOR ROBOTICS

*Lozitskaya A.V., Rod V.A., Varakina S.B., Kondratov A.P.*

*Moscow Polytechnic University, Moscow*

**Keywords:** deformation sensor, graphite, electrical conductivity, electrical resistance, strain, strain sensitivity.

**Abstract.** The electrical and mechanical properties of sensors made of polymers coated with graphite dispersion, intended for the manufacture of sensor devices used in robotics and "wearable electronics", have been studied. The difference between the deformation and strain sensitivity of sensors based on polymer films and fabrics with small and significant deformations has been established. Samples of sensors with strain and strain sensitivity exceeding known values were obtained.

Для производства датчиков сжатия в [1] разработаны упругие композиты, состоящие из пьезоэлектрических полимерных волокон и эластомерного связующего – полидиметилсилоксана. В работе [2] показана возможность получения волокнистых композитов, изготовленных на основе различных волокнистых материалов с покрытием, содержащим различные дисперсии углерода, применяемые в полиграфии для печати антенн RFID-меток трафаретным способом. Интеллектуальные текстильные системы с встроенными тензодатчиками на волокнистой основе используются в робототехнике и медицине для мониторинга движения человека [3-5]. Основной проблемой технологии электропроводящих полимерных композитов и возможности их практического применения в качестве датчиков является преодоление противоречия между повышением электропроводности за счет наполнения или размещения большего количества проводящего наполнителя на поверхности и снижение прочности и деформируемости.

Для производства датчиков силы и перемещений с механическими характеристиками, близкими к свойствам кожи человека и животных, пригодных для совмещения с оболочками промышленных манипуляторов или антроподобных роботов использовали армирующие материалы различной жесткости: эластичную пленку полипропилена отечественного производства (НПФ «Уфим») и трикотаж (хлопок 65%, полиэфир 35%) производства ВФТП

«Тривел». Для получения слоистых композитов достаточной электропроводности на поверхность армирующих материалов напыляли суспензию коллоидного графита в пропанол-2 из аэрозольной упаковки. Полученные датчики имели форму лент размером 10x100 мм [6, 8]. Для измерения напряжений и получения диаграмм циклической деформации применяли машинный комплекс для растяжения низко модульных материалов [7].

Электросопротивление при растяжении лабораторных образцов пленочных тензорезисторов монотонно увеличивается в 20-30 раз и несущественно изменяется при увеличении влажности воздуха (рис. 1).

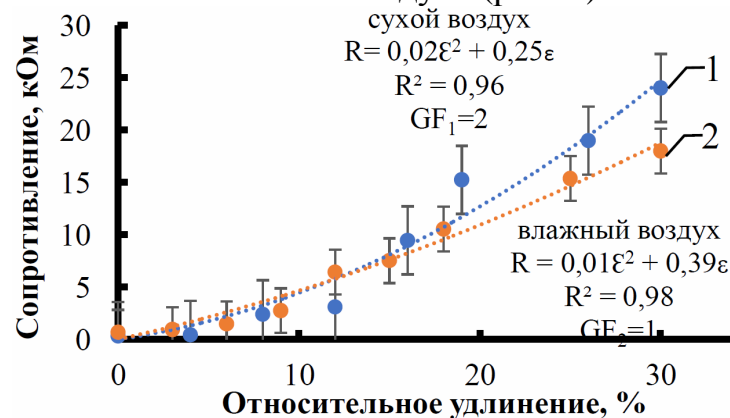


Рис. 1. Электрическое сопротивление композита на основе пленки полипропилена в сухом (1) и влажном воздухе (2)

Изменение электросопротивления трикотажа с покрытием при растяжении нормировали по величине сопротивления недеформированного материала при различной влажности воздуха (рис. 2).

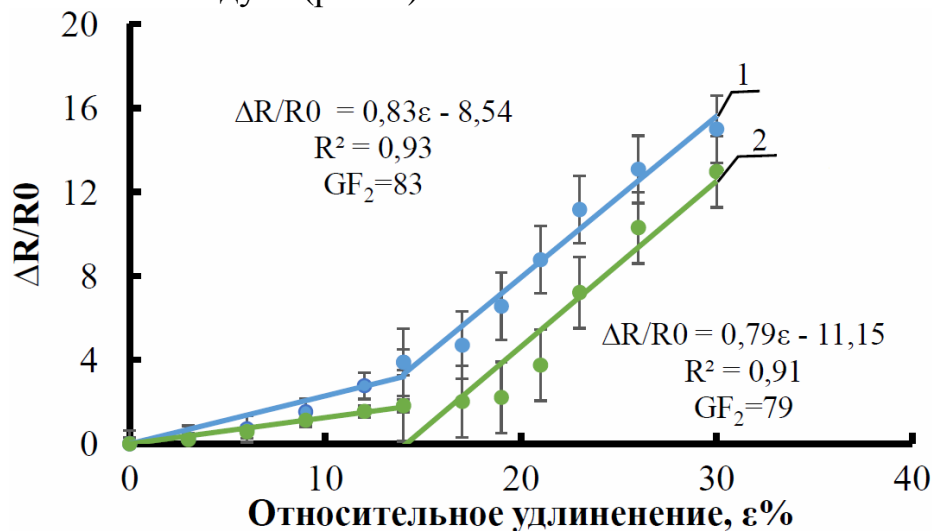


Рис. 2. Изменение электросопротивления композитов при растяжении; влажность воздуха: 1 – 45%, 2 – 100%

Тензочувствительность датчиков к деформации ( $GF$ ) и напряжению ( $QF$ ) при растяжении вычисляли по формулам:

$$GF = \frac{\Delta R/R_0}{\Delta l/l_0}, \quad QF = \frac{\Delta R/R_0}{\Delta \sigma}, [\text{Па}^{-1}]$$

где  $R_0$  и  $\Delta R$  – сопротивления и его изменение при деформации,  $l_0$  и  $\Delta l$  – длина и удлинение образца. Индекс  $GF_1$  или  $QF_2$  обозначает диапазон деформации при растяжении или сокращении (табл. 1).

Табл. 1. Результаты

Диапазон деформации, %	2÷35		35÷2	
Вариант исполнения датчика (механическая основа)	Трикотаж	Пленка	Трикотаж	Пленка
Деформационная чувствительность ( $GF$ )	1,5±0,2	563±7	3,5±1	3,5±1
Тензочувствительность ( $QF$ ), МПа <sup>-1</sup>	79±4	117±4	20±3	19±3

### Заключение

Установлена различная деформационная и тензочувствительность композитов на пленке и ткани в различных диапазонах растяжений. Деформационная чувствительность достигает 560, а тензочувствительность 117 МПа<sup>-1</sup>, что на порядок превышает чувствительность к напряжению известных полимерных композитов с различными электропроводящими наполнителями [3-5]. Влажность воздуха несущественно влияет на электрические свойства датчиков из графитсодержащих композитов.

### Список литературы

1. Kim J., Hwang J., Hwang Y. Simple and cost-effective method of highly conductive and elastic carbon nanotube / Polydimethylsiloxane composite for wearable electronics // Scientific Reports. . 2018, vol. 8(1), p. 1375.
2. Lozitskaya A.V., Kondratov A.P. Application of strain-sensitive graphite layers on fabric // Journal of Physics: Conference Series. 2022, vol. 2373, p. 092002.
3. Bashir T., Ali M., Persson N.K., Ramamoorthy S.K., Skrifvars M. Stretch sensing properties of conductive knitted structures of PEDOT-coated viscose and polyester yarns // Textile Research Journal. 2014, vol. 84, p. 323.
4. Lee J.H., Khan U., Kwak S.S., Hinchet R., S.-W. Kim Sustainable direct current powering a triboelectric nanogenerator via a novel asymmetrical design // Energy & Environmental Science. 2018, vol. 11, pp. 2057-2063.
5. Monti M., Natali M., Petrucci R., Kenny J.M., Torre L. Advanced fiber reinforced composites based on nanocomposite matrices // Journal of Applied Polymer Science. 2011, vol. 122, no. 4, pp. 2829-2836.
6. Lozitskaya A.V., Kondratov A.P., Samokhin V.N., Volinsky A.A. Mullins effect in polymer large deformation strain gauges // Journal of Polymer Research. 2023, vol. 30(1), p. 36.
7. Gunter S.V., Marchenko E.S., Yasenчук Y.F., Baigonakova G.A., Volinsky A.A. Portable Universal Tensile Testing Machine for Studying Mechanical Properties of Superelastic Biomaterials // Engineering Research Express. 2021, vol. 3(4), p. 045055.
8. Lozitskaya A.A., Kondratov A.P., Lozitskaya A.V., Volinsky A.A. Production and properties of electrically conductive polymer composites reinforced with cotton threads // Journal of Applied Polymer Science. 2024, e55410.

### Сведения об авторах:

Лоцицкая Анастасия Валерьевна – преподаватель;

Род Виктор Андреевич – студент;

Варакина Светлана Владимировна – студент;

Кондратов Александр Петрович – д.т.н., профессор.