Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2022-4-206-215 Оригинальная статья/Research article
УДК 675.92.035.2 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Проводящие полимерные композиты на основе тканей

Анастасия В. Лозицкая [1] belyashiko@mail.ru 0000-0002-6327-0484
Александр П. Кондратов [1] apkrezerv@mail.ru 0000-0001-6118-0808
Станислав Ю. Ямилинец [1] ymlnz@yandex.ru 0000-0002-9598-1117

1 Московский политехнический университет, ул. Большая Семеновская, 38, г. Москва, 107023, Россия

Аннотация. На примере тканей и трикотажа из смеси природных и синтетических полимерных волокон показана возможность получения полимерных композиций, предназначенных для изготовления электропроводящих элементов для авиации, робототехники и так называемой «носимой электроники» медицинского назначения. Исследованы механические и электрические свойства волокнистых композиций, наполненных дисперсиями углерода в различных аллотропных формах в сочетании и растворимыми и нерастворимыми высокомолекулярными соединениями в виде порошков или растворов. Дисперсии различных форм углерода с близким распределением частиц по размерам выбраны из числа коммерчески доступных марок полиграфических пигментов и ингредиентов резинотехнических и электротехнических изделий. Исследованы дисперсии углерода: графит, технический углерод и одностенные нанотрубки в виде стабилизированной водной суспензии. Рассмотрены известные и обоснованы оптимальные технологические приёмы введения электропроводящих ингредиентов в состав композиционных материалов с учетом структуры и состава тканей. Показано преимущество напыления электропроводящих частиц графита на поверхность волокон и нитей в сочетании с нанесением растворов и дисперсий, позволяющее получить композиции для резисторов и датчиков деформации с достаточным уровнем прочности и эластичности. Диаграмма растяжения датчиков и зависимость электросопротивления композиции от удлинения с высокой степенью достоверности может быть разделена на два линейных участка. Первый участок в интервале относительной деформации растяжения от 2 до 30% в наибольшей степени соответствует практическому применению. Коэффициент чувствительности к деформации (GF) тензодатчика на основе ткани не превышает 10 в диапазоне деформации в диагональном направлении до 20 %, а коэффициент чувствительности к деформации на трикотаже вне зависимости от направления высечки образцов из полотна на два порядка выше и составляет около 950 до относительного удлинения 30 % и 90 в интервале относительного удлинения 30÷45 %. Максимальная тензочувствительность (QF) лабораторных образцов на основе трикотажного полотна, при деформации менее 30% составляет около1350 кПа$^{-1}$ и 4900 кПа$^{-1}$при предельных удлинениях%. Гистерезисе электрических свойств при многократных деформациях не превышает 4%.

Ключевые слова: полимеры, ткани, электрические характеристики, трикотаж, коэффициент тензочувствительности, дисперсии графита.

Electrical conductivity of modified fabrics with carbon coating

Anastasia V. Lozitskaya [1] belyashiko@mail.ru 0000-0002-6327-0484
Alexander P. Kondratov [1] apkrezerv@mail.ru 0000-0001-6118-0808
Stanislav U. Yamilinets [1] ymlnz@yandex.ru 0000-0002-9598-1117

1 Moscow Polytechnic University, 38 B.Semenovskaya str., Moscow, 107023, Russia

Abstract. Using the example of fabrics and knitwear from a mixture of natural and synthetic polymer fibers, the possibility of obtaining polymer compositions intended for the manufacture of electrically conductive elements for aviation, robotics and so-called "wearable electronics" for medical purposes is shown. The mechanical and electrical properties of fibrous compositions filled with carbon dispersions in various allotropic forms in combination with both soluble and insoluble high-molecular compounds in the form of powders or solutions have been studied. Dispersions of various forms of carbon with a close particle size distribution were selected from among commercially available brands of printing pigments and ingredients of rubber and electrical products. Carbon dispersions were investigated: graphite, carbon black and single-walled nanotubes in the form of a stabilized aqueous suspension. The well-known and justified optimal technological methods of introducing electrically conductive ingredients into the composition of composite materials, taking into account the structure and composition of fabrics. The advantage of spraying electrically conductive graphite particles on the surface of fibers and filaments in combination with the application of solutions and dispersions is shown, which makes it possible to obtain compositions for resistors and strain sensors with a sufficient level of strength and elasticity. The stretching diagram of the sensors and the dependence of the electrical resistance of the composition on the elongation with a high degree of confidence can be divided into two linear sections. The first section in the range of relative tensile strain from 2 to 30% is most consistent with practical application. The coefficient of sensitivity to deformation (GF) of a fabric-based strain gauge does not exceed 10 in the range of deformation in the diagonal direction up to 20%, and the coefficient of sensitivity to deformation on knitwear, regardless of the direction of cutting samples from the canvas, is two orders of magnitude higher and is about 950 to a relative elongation of 30% and 90 in the range of a relative elongation of 30÷45%. The maximum strain sensitivity (QF) of laboratory samples based on knitted fabric, with a deformation of less than 30%, is about 1350 kPa-1 and 4900 kPa-1 at maximum elongation%. The hysteresis of electrical properties with multiple deformations does not exceed 4%.

Keywords: polymers, fabrics, electrical characteristics, knitwear, strain sensitivity coefficient, graphite dispersion.

Для цитирования

Лозицкая А.В., Кондратов А.П., Ямилинец С.Ю. Проводящие полимерные композиты на основе тканей // Вестник ВГУИТ. 2022. Т. 84. № 4. С. 206–215. doi:10.20914/2310-1202-2022-4-206-215

For citation

Lozitskaya A.V., Kondratov A.P., Yamilinets S.Y. Electrical conductivity of modified fabrics with carbon coating. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2022. vol. 84. no. 4. pp. 206–215. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2022-4-206-215

© 2022, Лозицкая А.В. и др. / Lozitskaya A.V. et al.

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

Прогресс робототехники обусловливает необходимость разработки и массового применения различных резисторов, антенн, тензодатчиков и датчиков деформаций из эластичных материалов. Кроме реализации больших деформаций в некоторых случаях к тезодатчикам предъявляются требования совместимости с тканями верхней одежды и нижнего белья, высокой тензочувствительности в широком диапазоне удлинений [1, 2].

Тензодатчики и датчики деформации содержат, по меньшей мере, два основных элемента: подложку и электропроводящий слой полимерной композиции [3–5].

В известных на рынке [6, 7] датчиках, датчиках деформации и средствах измерения параметров движущихся объектов наиболее часто в качестве подложек датчиков деформации применяются синтетические полимеры [8], такие как карбоцепные каучуки, полиорганосилоксаны, имеющие относительное удлинение при разрыве порядка тысячи процентов [9]. Для того чтобы совмещать тензодатчики деформации с одеждой и применяться различные волокнистые тканые и нетканые материалы [4].

Цель работы – получение электропроводящих датчиков деформации на основе эластичных волокнистых материалов.

Материалы и методы

В качестве объектов исследования использовали следующие вещества, полимерные материалы и ткани.

Ткани:

- ткань саржевого переплетения марки Лицей Active280, арт. 37017, смесового состава волокон: 48% Вискоза, 48% полиэфир, 4% полиуретан, (производитель ООО «Чайковская текстильная компания»);
- трикотажное полотно кулирного переплетения, смесового состава волокон хлопок 65%, полиэфир 35%, применяемое для пошива для нижнего белья и внутренних слоев специальной одежды (производитель (ВФТП «Тривел»).

Модификаторы электропроводности:

- одностенные углеродные нанотрубоки марки TUBALL™ COATOCSiA, в форме водной суспензии;
- электропроводящий пигмент для красок марки Printex XE 2-B; технический углерод марки F-200GS; порошок технического углерода марки AX-020;
- дисперсия графита с политетрафторэтиленом в пропаноле-2 спрей в аэрозольной упаковке марки Graphit 33/200.

Растворы полимеров для модификации тканей в аэрозольной упаковке:

- раствор сополимера этилена с винилацетата в о-ксилоле в аэрозольной упаковке марки Tesa 60150;
- раствор сополимера стирола, бутадиена и изопрена в стироле марки Krylon 7777-Super QuickGripSprayAdhesive.

Диаметр и среднее распределения частиц графита и нанотрубок по размерам (рисунок 1) определяли с помощью лазерного анализатора частиц Микросайзер 201 фирмы «ВА ИНСТАЛТ».

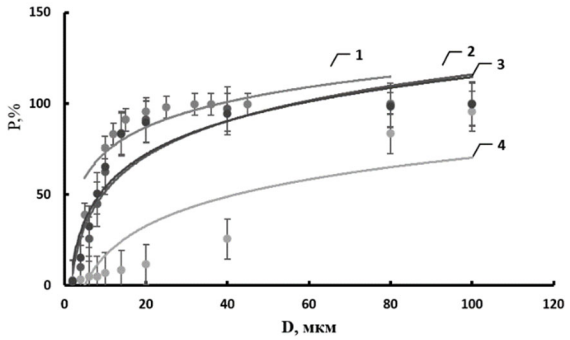


Рисунок 1. Интегральное распределение частиц углерода в дисперсии (P,%) по размерам: 1 – электропроводящий пигмент для красок; 2 – технический углерод; 3 – дисперсия графита с политетрафторэтиленом в пропаноле-2; 4 – одностенные углеродные нанотрубоки

Figure 1. Integral distribution of carbon particles in dispersion (P,%) by size: 1 – electrically conductive pigment for paints; 2 – carbon black; 3 – dispersion of graphite with polytetrafluoroethylene in propanol-2; 4 – single-walled carbon nanotubes

Образцы для испытаний размером 10 х 80 мм вырезали из полотен промышленного производства, поверхность которых покрыта слоями растворов сополимеров и дисперсией графита с политетрафторэтиленом. Слои растворов сополимеров наносились путем напыления из аэрозольной упаковки с контролем изменения массы после сушки.

Водная суспензия одностенных нанотрубок TUBALL™ COATOCSiA с добавкой полиоксиэтиленгликолевого эфира ОС–20 и неионогенного поверхностно-активного вещества ОП–7 после ультразвуковой обработки наносилась на поверхность тканей трафаретным способом печати. Суспензия продавливалась ракелем через печатную форму с сеткой линиатурой 120 lpi. Образцы изготавливались в лабораторных условиях при температуре 24 ± 2С и сушились при относительной влажности 45–50% до постоянной массы.

Электропроводящие пигменты, графит и технический углерод в виде порошка наносились сверх слоев сополимеров методом напыления.

Серии по пять образцов ткани и ткани с покрытием каждого вида для механических испытаний вырезаны в четырех направлениях относительно расположения нитей основы тканей: вдоль, поперек и по диагоналям под 45 и 135 градусов.

Датчик деформации с покрытием дисперсией графита и / или нанотрубок, получали следующим образом: образцы разрезали на ленты длиной 100 мм, размещали зеркально и укладывали отрезки друг на друга, т. е. производили дублирование отрезков пленки со слоем клея и электропроводящего наполнителя, совмещением слоев электропроводящего наполнителя внутри датчика (рисунок 2).

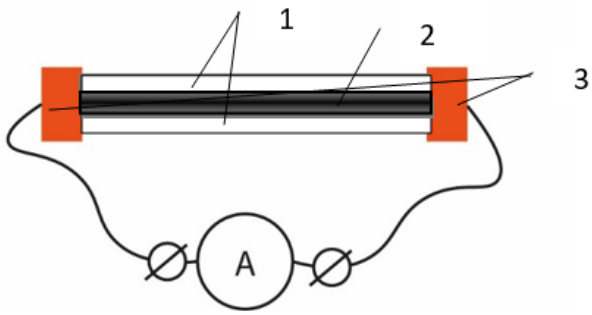


Рисунок 2. Схема сборки тензодатчика для испытаний электропроводности: 1 – слои волокнистого материала; 2 – слой дисперсии электропроводящего наполнителя; 3 – электроды (медная фольга)

Figure 2. Assembly diagram of aload cell for electrical conductivity tests: 1 – layers of fibrous material; 2 – layer of dispersion of an electrically conductive filler; 3 – electrodes (copperfoil)

По концам отрезков между слоями укладывали плоские электроды из медной фольги с проводом. Таким образом производили соединение слоя графита с источником постоянного тока и измерителем электрического сопротивления.

Коэффициент чувствительности тензодатчика к деформации *GF* вычисляется по формуле:

$$GF = \frac{\Delta R / R_0}{\Delta l / l_0} \qquad (1)$$

где R_0 – начальное сопротивление датчиков, Ом, ΔR – относительное изменение сопротивления при деформации Ом, l_0 – начальная длина датчика, м, а Δl – абсолютное удлинение, м.

Тензочувствительность датчика *QF* к механическому напряжению при деформации растяжения вычисляется по формуле:

$$QF = \frac{\Delta R / R0}{\Delta \sigma}, \qquad (2)$$

где, R_0 – начальное сопротивление датчиков, Ом, ΔR – изменение сопротивления датчиков при деформации растяжения, $\Delta\sigma$ – увеличение механического напряжения [Па].

Результаты

В датчиках деформации и резисторах чувствительных к составу среды [8–11] подложка является внешним слоем, определяющим их механические свойства и тензочувствительность. Использование тканей и трикотажа в сочетании с полимерной пропиткой позволяет подготовить подложки с различной податливостью в широком диапазоне обратимой деформации, снижающейся на порядок при достижении определенного предела растяжения что соответствует податливости кожи человека и теплокровных животных [8, 9].

Деформация ткани вдоль и поперек расположения нитей основы определяется механическими свойствами нитей и существенно зависит от типа плетения. Продольная и поперечная деформация нитей в ткани саржевого переплетения невелика и не обеспечивают достаточной для датчиков податливости.

Рассчитанное по геометрической схеме значение деформации «смятия» по диагонали квадратных ячеек переплетения нитей в ткани отличается от значений относительного удлинения вырезанных из ткани образцов с покрытием на лицевой стороне. Это обусловлено тем, что эластичная композиция первого слоя, содержащая полимер, проникает в структуру ткани и обеспечивает дополнительную связь между нитями по внешней поверхности. Полимерное связующее образует пленку и обеспечивает связь между концами обрезанных волокон, что не позволяет им рассыпаться при растяжении. В результате образуется композиционный материал с механическими свойствами, существенно отличающимися от механических свойств ткани. За счет связи между волокнами и разрезанными нитями значения относительного удлинения вырезанных из ткани лент достигают 100%, что в 2,2 раза больше, чем у аналогичного образца ткани без покрытия. Для деформации и разрушения ткани с полимерным покрытием необходимо приложить большее напряжение. Значение прочностиобразца с двумя слоями полимерной композиции, нанесенной напылением аэрозоля, превышает предел прочности ткани на порядок.

Нанесение дисперсии графита, технического углерода и нанотрубок делает ткани электропроводящими (Табл. 1) с линейной вольтамперной характеристикой (рисунок 3).

При близкой дисперсности все исследуемые порошки графита формируют на поверхности тканей покрытых растворами сополимеров слой одинаковой электропроводности (10÷90 кОм). Электропроводящий пигмент для красок марки Printex XE 2–B, по-видимому, содержит дополнительные ингредиенты, наличие которых увеличивает сопротивления слоя на порядок.

Известно использование технического углерода для получения электропроводящих полимерных композитов [11, 15]. Получены смеси полиэтилена с техническим углеродом, стабильность которых оценивается по влиянию температуры и относительной влажности на относительноесопротивление. Из результатов видно, что с повышением температуры и относительной влажности значение сопротивления имеет тенденцию к уменьшению, и его зависимость от деформации увеличивается.

Таблица 1.

Электрическоесопротивление трикотажных лент шириной 10 мм

Table 1.

Electrical resistance of knitted tapes with a width of 10 mm

Углеродные наполнители | Carbon fillers	F-200GS	AX-020	Нанотрубки	Graphit 33/200	PrintexXE 2-B
Сопротивление, кОм | Impedance, kOhm	10 ± 2	12 ± 3	12 ± 2,5	90 ± 5,8	450 ± 65

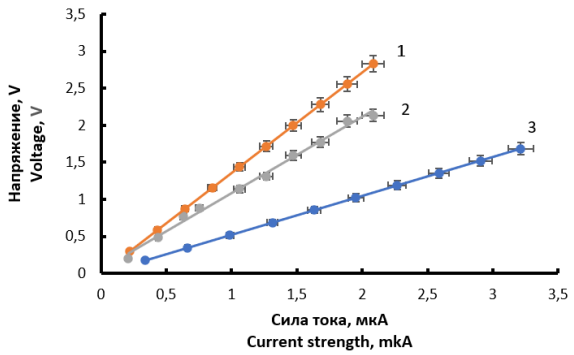


Рисунок 3. Вольтамперная характеристика эластичной ткани саржевого переплетения с электропроводящим покрытием: 1 – технический углерод, 2 – нанотрубки, 3 – графит

Figure 3. Voltage characteristic of elastic twill weave fabric with an electrically conductive coating: 1 – carbon black, 2 – nanotubes, 3 – graphite

Добавка политетрафторэтилена, введенная в состав спрея марки Graphit 33/200, для предотвращения агрегации частиц графита имеет незначительный негативный эффект снижения электропроводности. Использование данного модификатора тканей в аэрозольной упаковке представляется наиболее перспективным.

Для обоснования возможности использования тканей пропитанных растворами полимеров и покрытых дисперсиями графита в качестве основы резисторов и прогнозирования их свойств необходимо количественное описание напряжения в ткани, возникающего при растяжении и зависимости электрической проводимости полимерной композиции от деформации.

Для использования тканей с покрытием в качестве тензодатчиков исследовали их деформационно-прочностные свойства.

Диаграмма растяжения датчиков с высокой степенью достоверности (R^2 = 0,92–0,99) может быть разделена на два линейных участка (рисунок 4). Первый участок для тканисаржевого переплетения марки Лицей Active в интервале относительной деформации растяжения 2÷30% в наибольшей степени соответствует практическому применению волокнистого материала для изготовления тензодатчиков и датчиков деформации на спецодежде из тканей и описывается уравнением $\sigma = 0{,}09\ \varepsilon + 0{,}28$. Второй участок в интервале 30 ÷ 100% уравнением $\sigma = 0{,}3\ \varepsilon - 6{,}74$. Для трикотажного полотна кулирного переплетения в интервале относительной деформации растяжения 2 ÷ 30%, который также соответствует практическому применению тензодатчиков зависимость напряжения от деформации описывается уравнением $\sigma = 0{,}11\ \varepsilon + 0{,}45$, а второй участок в интервале 30 ÷ 100% уравнением $\sigma = 0{,}19\ \varepsilon - 4{,}3$.

По технической диаграмме растяжения датчиков видно, что механические свойства на стадии удлинения могут быть охарактеризованы величиной условного модуля упругости: для эластичной ткани саржевого переплетения модуль упругости равен 11 МПа при деформации менее 30% и 30 МПа при больших удлинениях для трикотажного полотна модуль упругости равен 9 МПа при деформации менее 30% и 19 МПа при предельных удлинениях.

Тензочувствительность датчиков к механическому напряжениюна различных волокнистых основах при растяжении представлены в таблице 2.

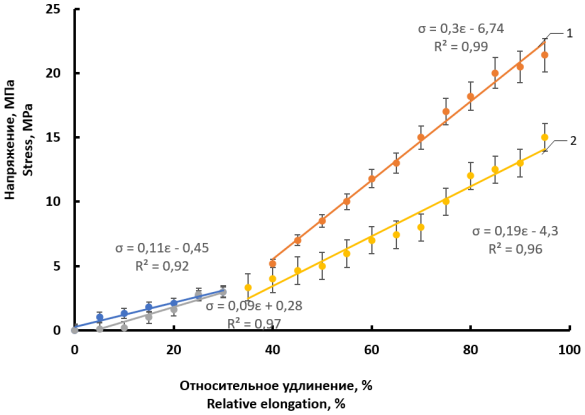


Рисунок 4. Зависимость напряжения от деформациипри растяжении лент вырезанных по диагонали: 1-эластичная ткань саржевого переплетения, 2 – трикотажное полотно

Figure 4. The dependence of stress on strain during diagonal stretching: 1 – elastic twill weave fabric, 2 – knitted fabric

Таблица 2.

Тензочувствительность волокнистых датчиков

Table 2.

Strain sensitivity of fiber sensors

Волокнистая основа датчика	Тензочувствительность ΔF, кПа$^{-1}$	
	Растяжение в диапазоне относительной деформации, %	
	0÷15	15÷30
Ткань саржевого переплетения	1234	3765
Трикотажное полотно	1352	4882

Вследствие высокой податливости тканевых подложек коэффициент тензочувствительности во всем диапазоне деформаций превосходит достигнутое значение *GF* на электропроводящих композитах матричной структуры на три десятичных порядка [16].

Обсуждение

Наличие двух линейных интервалов на зависимости механических и электрических свойств полимерных композитов на основе тканей обусловлено их макроструктурой и наличием синтетического полимера в составе нити. В диапазоне деформаций 0 ÷ 30% расстояние между частицами графита на нитях в направлении растяжения ткани увеличивается вследствие чего частично нарушается их электрический контакт и электросопротивление возрастает. Однако при этом, вследствие боковой контракции ленты и сближения нитей, образуются контакты в поперечном направлении и снижение электропроводности датчика не столь значительно.

При вытяжке более 30% боковая контракция ленты завершается, расстояние между центрами частиц графита на нитях увеличивается, электрические контакты нарушаются с большей интенсивностью и сопротивление возрастает в 40 раз быстрее (рис. 5).

Для определения параметров чувствительности тензодатчика к деформации (GF) достаточно информации об электрическом сопротивлении деформированных образцов многослойных тензорезисторов, выполненных на различных подложках (таблица 3) и значения электросопротивления слоя проводящей композиции до растяжения (R_0).

Коэффициент чувствительности к деформации (*GF*) тензодатчика на основе ткани не превышает 10 в диапазоне деформации в диагональном направлении до 20%, а коэффициент чувствительности к деформации на трикотаже вне зависимости от направления высечки образцов из полотна на два порядка выше и составляет 945 ± 5,2 до относительного удлинения до 30% и 92 ± 2,2 в интервале относительного удлинения 30÷45%.

По данным технологического университета Тоёхас (Япония) наибольшую чувствительность к деформации полимерных композитных тензодатчиков удается получить при использовании наночастиц серебра с размерами менее 100 нм [10]. В пленках из полидиметилсилоксана с нанодисперсией серебра относительное изменение сопротивления возрастает в 20 раз почти линейно (0,05 ÷ 0,98) при растяжении композитной пленки до 50%. Лабораторный образец такого датчика способен растягиваться до 140%, но сопротивление может быть корректно измерено при относительном удлинении лишь до 60%.

Коэффициент чувствительности к деформации (*GF*) тензодатчика с наночастицами серебра в эластичной матрице, полученного в работе [10] составляет на начальном этапе растяжения 270, а датчика при большей относительной деформации 110. Тензодатчики и датчики деформациис высоким коэффициентом GF полученным за счет монолитной интеграции растяжимой подложки с изменяющейся жесткостью и чувствительной пленки, содержащей перколяционную сеть из нанопроволок серебра признаны соответствующими эксплуатационным требованиям гибкой электроники [17–18]. При этом параметров тензочувствительности, т. е. изменению электрического сигнала при изменении механического напряжения в указанных статьях не приводится.

При циклических деформациях растяжения и сокращения датчиков проявляется эффект Патрикеева-Малинза, который заключается в обратимости деформации и существенном различии первого и последующих циклов. Такое явление наблюдается не только в резистивных тензодатчиках, но и в механике композитов органической и неорганической природы [19]. В настоящее время физическая природа эффекта Патрикеева–Маллинза является объектом теоретических и экспериментальных исследований в коллективах ученых разных стран [20].

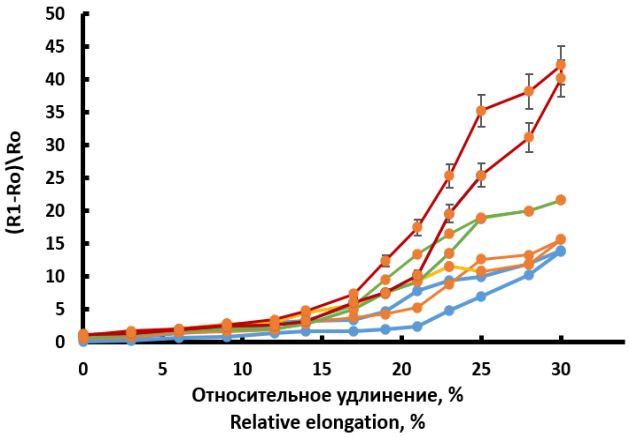


Рисунок 5. Циклическая деформация датчика на основе трикотажа

Figure 5. Cyclic deformation of the sensor based on knitwear

На рисунке 5 показано относительное изменениеэлектросопротивления тензодатчика на основе трикотажа при многократном растяжении. Видно, что первый цикл деформации имеет большее изменение электросопротивления, чем последующие циклы. Это различие имеет место как при растяжении, так и при сокращении. После второго цикла эффект Патрикеева-Малинза не проявляется. При многократных деформациях гистерезис не превышает 4%.

Гистерезис играет важную роль для тензодатчиков находящихся под динамической нагрузкой. Это эксплуатационный критерий для датчика, который предназначен для использования в качестве носимой электроники. Гистерезис сигнала датчика свыше 8–10% может приводить к потере чувствительности датчика к нагрузке вследствие увеличения доли необратимой деформации [21, 22].

Заключение

Показана возможность получения электропроводящих волокнистых материалов путем послойного нанесения на ткани аэрозолей растворов высокомолекулярных соединений и дисперсий графита в органических жидкостях и / или водной дисперсии углеродных нанотрубок.

Предложено устройство, изготовлены лабораторные образцы и получены вольтампмерные характеристики резисторов и тензодатчиков на основе тканей и трикотажа с углеродным покрытием. Установлены линейные зависимости сигнала датчика от деформации, с различными значениями чувствительности к деформации при малых и предельных удлинениях. Коэффициент чувствительности к деформации (*GF*) тензодатчика на основе ткани не превышает 10 в диапазоне деформации в диагональном направлении до 20%, а коэффициент чувствительности к деформации тензодатчика на основе трикотажа вне зависимости от направления высечки образцов из полотна на два порядка выше и составляет 950 до относительного удлинения до 30% и 90 в интервале относительного удлинения 30÷45%.

Определены значения истиной тензочувствительности датчиков, полученных напылением суспензии графита на трикотаж, которые вследствие высокой податливости трикотажа достигают рекордных 4900 и 1350 кПа$^{-1}$ при больших и малых удлинениях соответственно.

Литература

1 Bose A., Zhang X., Maddipatla D., ScreenPrinted Strain Gauge for Micro-Strain Detection Applications // IEEE Sensors Journal том: 20, выпуск: 21, 11. 2020. 12652–12660. DOI: 10.1109/JSEN.2020.3002388

2 Leseman, ZC. Design of the Microscale Optomechanical Load Cell for Micro-Nanostructured Materials Testing Arabian Journal for Science and Engineering volume 47, p. 1053–1067. DOI: 10.1007/s13369–021–06019–2

3 Liu Y., Pharr M., Salvatore G.A. Lab-on-Skin: A Review of Flexible and Stretchable Electronics for Wearable Health Monitoring // ACS Nano. 2017. Vol. 11, № 10. P. 9614–9635. DOI:10.1021/acsnano.7b04898

4 Lozitskaya, A.V., Kondratov, A.P., Baranov, V.A., Cherkasov, E.P., Printed Load Cells on Clothing Made of Fire-Protective Fabric // Всборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019 Workshopon Materialsand Engineering in Aeronautics. 2020. С. 012017. DOI:10.1088/1757–899X/714/1/012017

5 Zhang Wenliang., Riccardo Frisenda., Qinghua Zhao., Felix Carrascoso. Paper-supported WS2 StrainGauges //Preprints 2021, P. 20210–70021

6 Ogunleye, R.O.; Rusnakova, S. A review of prestressed fibre-reinforced polymer matrix composites. Polymers. 2022, 14(1), 60. DOI:10.20944/preprints202107.0021.v1

7 Sinha Manish; Luke Achenie, E.K. Systematic design of blanket wash solvents with recovery. AdvancesinEnvironmental Research. 2001, 5(3), 239–249. DOI:10.1016/S1093–0191(00)00058–7

8 Xu C., Yang Y., Gao W. Skin-Interfaced Sensors in Digital Medicine: from Materials to Applications // Matter. 2020. Vol. 2, № 6. P. 1414–1445. DOI:10.1016/j.matt.2020.03.020

9 Zhang C. et al. Rational Design of a Flexible CNTs@PDMS Film Patterned by Bio-Inspired Templates as a Strain Sensor and Supercapacitor // Small. John Wiley & Sons, Ltd, 2019. Vol. 15, № 18. P. 1805493. DOI:10.1002/smll.201805493

10 Jang K. – I. et al. Rugged and breathable forms of stretchable electronics with adherent composite substrates for transcutaneous monitoring // Nat. Commun. 2014. Vol. 5, № 1. P. 4779. DOI:10.1038/ncomms5779

11 Kondratov, A.P., Nagornova, I.V., Varepo, L.G. Tenso-resistive printed sensors for flexible elements of systems and mechanisms // Journal of Physics: Conference Series, DOI:10.1088/1742 – 6596/1210/1/012067

12 Марков В. А, Кандырин Л. Б, Марков А.В., // Конструкции из композиционных материалов (КМ), 2013, 4, стр. 40 – 44. DOI: 10.32362/2410–6593–2019–14–2–60–69

13 S. Han Mina, A.M. Asrulnizamb, M. Atsunoric and M. Mariattid Properties of Stretchable and Flexible Strain Sensor Based on Silver/PDMS Nanocomposites //Materials Today: Proceedings Vol. 17, Part 3, 2019, P. 616–622. DOI:10.1016/j.matpr.2019.06.342

14 J. Lee, S. Kim, J. Lee, D. Yang, B.C. Park, S. Ryu, I. Park, Highly sensitive and selective multidimensional resistive strain sensors based on a stiffness-variant stretchable substrate // Nanoscale, 6, 2014, P. 11932–11939. DOI:10.1039/C7NR08118A

15 Krutyakov Y., Kudrinskij A., Method of application of silver nanoparticles to textile materials // Pat. RU 2680078, D06B 1/00, 14.02.2019. № 5. https://patenton.ru/patent/RU2680078C2/en. (дата обращения: 15.07.2021)

16 Hu Z., Xin Y. & Fu Q. Ultrahigh sensitivity and wide strain range of porous pressure sensor based on binary conductive fillers by in-situ polymerization, J. Polymer Research, 2021, 28, 134. DOI:10.1007/s10965–021–02484–3

17 Müller M.; Kolář V.; Piš, D. Low-cycle fatigue behavior of 3D-printed PLA reinforced with natural filler. Polymers. 2022, 14(7), 1301. DOI:10.3390/polym14071301

18 Hamlaoui O.; Klinkova O.; Tawfiq I.; Elleuch R. Effect of the glass fiber content of a polybutylene. Polymers. 2022, 14(1), 17. DOI: 10.3390/polym14010017

19 Sukcharoen. K.; Noraphaiphipaksa N.; Kanchanomai C.; Hasap A. Experimental and numerical evaluations of localized stress relaxation for vulcanized rubber. Polymers. 2022, 14(5), 873. DOI: 10.3390/polym14050873

20 Jorda J.; Kain G.; Barbu M.C.; Köll B.; Petutschnigg A.; Kra I.P. Mechanical properties of cellulose and flax fiber unidirectional reinforced plywood. Polymers. 2022, 14(4), 843. DOI: 10.3390/polym14040843

21 Gottstein G. Physical Foundations of Materials Science. Publisher: Springer Berlin, Heidelberg 2004; 502 p. DOI:10.1007/978–3–662–09291–0

22 Zhao C.; Li J.; Jiang Z.; Chen C. Measurement of the infinite dilution diffusion coefficients of small molecule solvents in silicone rubber by inverse gas chromatography. European Polymer Journal. 2006, 42(3), 615–624. DOI:10.1016/J.EURPOLYMJ.2005.08.019.

References

1 Bose A., Zhang X., Maddipatla D., ScreenPrinted Strain Gauge for Micro-Strain Detection Applications // IEEE Sensors Journal том: 20, выпуск: 21, 11. 2020. 12652–12660. **DOI**: 10.1109/JSEN.2020.3002388

2 Leseman, ZC. Design of the Microscale Optomechanical Load Cell for Micro-Nanostructured Materials Testing Arabian Journal for Science and Engineering volume 47, p. 1053–1067. **DOI**: 10.1007/s13369–021–06019–2

3 Liu Y., Pharr M., Salvatore G.A. Lab-on-Skin: A Review of Flexible and Stretchable Electronics for Wearable Health Monitoring // ACS Nano. 2017. Vol. 11, № 10. P. 9614–9635. DOI:10.1021/acsnano.7b04898

4 Lozitskaya, A.V., Kondratov, A.P., Baranov, V.A., Cherkasov, E.P., Printed Load Cells on Clothing Made of Fire-Protective Fabric // Всборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019 Workshopon Materialsand Engineering in Aeronautics. 2020. С. 012017. DOI:10.1088/1757–899X/714/1/012017

5 Zhang Wenliang., Riccardo Frisenda., Qinghua Zhao., Felix Carrascoso. Paper-supported WS2 StrainGauges //Preprints 2021, P. 20210–70021

6 Ogunleye, R.O.; Rusnakova, S. A review of prestressed fibre-reinforced polymer matrix composites. Polymers. 2022, 14(1), 60. DOI:10.20944/preprints202107.0021.v1

7 Sinha Manish; Luke Achenie, E.K. Systematic design of blanket wash solvents with recovery. AdvancesinEnvironmental Research. 2001, 5(3), 239–249. DOI:10.1016/S1093–0191(00)00058–7

8 Xu C., Yang Y., Gao W. Skin-Interfaced Sensors in Digital Medicine: from Materials to Applications // Matter. 2020. Vol. 2, № 6. P. 1414–1445. DOI:10.1016/j.matt.2020.03.020

9 Zhang C. et al. Rational Design of a Flexible CNTs@PDMS Film Patterned by Bio-Inspired Templates as a Strain Sensor and Supercapacitor // Small. John Wiley & Sons, Ltd, 2019. Vol. 15, № 18. P. 1805493. DOI:10.1002/smll.201805493

10 Jang K. – I. et al. Rugged and breathable forms of stretchable electronics with adherent composite substrates for transcutaneous monitoring // Nat. Commun. 2014. Vol. 5, № 1. P. 4779. DOI:10.1038/ncomms5779

11 Kondratov, A.P., Nagornova, I.V., Varepo, L.G. Tenso-resistive printed sensors for flexible elements of systems and mechanisms // Journal of Physics: Conference Series, DOI:10.1088/1742 – 6596/1210/1/012067

12 Марков В. А, Кандырин Л. Б, Марков А.В., // Конструкции из композиционных материалов (КМ), 2013, 4, стр. 40 – 44. DOI: 10.32362/2410–6593–2019–14–2–60–69

13 S. Han Mina, A.M. Asrulnizamb, M. Atsunoric and M. Mariattid Properties of Stretchable and Flexible Strain Sensor Based on Silver/PDMS Nanocomposites //Materials Today: Proceedings Vol. 17, Part 3, 2019, P. 616–622. DOI:10.1016/j.matpr.2019.06.342

14 J. Lee, S. Kim, J. Lee, D. Yang, B.C. Park, S. Ryu, I. Park, Highly sensitive and selective multidimensional resistive strain sensors based on a stiffness-variant stretchable substrate // Nanoscale, 6, 2014, P. 11932–11939. DOI:10.1039/C7NR08118A

15 Krutyakov Y., Kudrinskij A., Method of application of silver nanoparticles to textile materials // Pat. RU 2680078, D06B 1/00, 14.02.2019. № 5. https://patenton.ru/patent/RU2680078C2/en. (дата обращения: 15.07.2021)

16 Hu Z., Xin Y. & Fu Q. Ultrahigh sensitivity and wide strain range of porous pressure sensor based on binary conductive fillers by in-situ polymerization, J. Polymer Research, 2021, 28, 134. DOI:10.1007/s10965–021–02484–3

17 Müller M.; Kolář V.; Piš, D. Low-cycle fatigue behavior of 3D-printed PLA reinforced with natural filler. Polymers. 2022, 14(7), 1301. DOI:10.3390/polym14071301

18 Hamlaoui O.; Klinkova O.; Tawfiq I.; Elleuch R. Effect of the glass fiber content of a polybutylene. Polymers. 2022, 14(1), 17. DOI: 10.3390/polym14010017

19 Sukcharoen. K.; Noraphaiphipaksa N.; Kanchanomai C.; Hasap A. Experimental and numerical evaluations of localized stress relaxation for vulcanized rubber. Polymers. 2022, 14(5), 873. DOI: 10.3390/polym14050873

20 Jorda J.; Kain G.; Barbu M.C.; Köll B.; Petutschnigg A.; Kra I.P. Mechanical properties of cellulose and flax fiber unidirectional reinforced plywood. Polymers. 2022, 14(4), 843. DOI: 10.3390/polym14040843

21 Gottstein G. Physical Foundations of Materials Science. Publisher: Springer Berlin, Heidelberg 2004; 502 p. DOI:10.1007/978–3–662–09291–0

22 Zhao C.; Li J.; Jiang Z.; Chen C. Measurement of the infinite dilution diffusion coefficients of small molecule solvents in silicone rubber by inverse gas chromatography. European Polymer Journal. 2006, 42(3), 615–624. DOI:10.1016/J.EURPOLYMJ.2005.08.019.

Сведения об авторах

Анастасия В. Лозицкая преподаватель, Московский политехнический университет, ул. Большая Семеновская, 38, г. Москва, 107023, Россия, belyashiko@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-6327-0484

Александр П. Кондратов д.т.н., профессор, Московский политехнический университет, ул. Большая Семеновская, 38, г. Москва, 107023, Россия, apkrezerv@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-6118-0808

Станислав Ю. Ямилинец Московский политехнический университет, ул. Большая Семеновская, 38, г. Москва, 107023, Россия, ymlnz@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0002-9598-1117

Information about authors

Anastasia V. Lozitskaya Lecturer, Moscow Polytechnic University, 38 Bolshaya Semenovskaya str., Moscow, 107023, Russia, belyashiko@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-6327-0484

Alexander P. Kondratov Dr. Sci. (Chem.), professor, Moscow Polytechnic University, 38 Bolshaya Semenovskaya str., Moscow, 107023, Russia, apkrezerv@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-6118-0808

Stanislav U. Yamilinets Moscow Polytechnic University, 38 Bolshaya Semenovskaya str., Moscow, 107023, Russia, ymlnz@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0002-9598-1117

Вклад авторов

Анастасия В. Лозицкая Экспериментальная часть исследования, написание рукописи и выполнение расчетов

Александр П. Кондратов консультирование в ходе исследования и в написании рукописи, обзор литературных источников по исследуемой проблеме.

Станислав Ю. Ямилинец сбор материалов для экспериментальной части исследования,

Contribution

Anastasia V. Lozitskaya Experimental part of the study, writing a manuscript and performing calculations

Alexander P. Kondratov consulting during the research and in the writing of the manuscript, review of literary sources on the problem under study

Stanislav U. Yamilinets collection of materials for the experimental part of the study

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 18/10/2022	**После редакции** 28/10/2022	**Принята в печать** 01/11/2022
Received 18/10/2022	**Accepted in revised** 28/10/2022	**Accepted** 01/11/2022