

Оригинальная статья / Original article

УДК 538.955

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-3-178-190>

Механические свойства силиконового полимера с магнитным наполнителем в магнитном поле

И. Ю. Сутарина¹, К. К. Новиков¹, Е. А. Соколов^{1✉},
К. А. Матарыкин¹, П. А. Ряполов¹

¹Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: evgeniysokolov1@yandex.ru

Резюме

Цель. Исследовать изменение механических свойств магнитоореологического силиконового эластомера, состоящего из полимера, наполненного наночастицами магнетита, под воздействием неоднородного магнитного поля электромагнита.

Методы. В качестве образцов исследовались двухкомпонентные силиконовые каучуки, наполненные магнетитовыми частицами. Изготовленные образцы отличались геометрическими размерами, концентрацией магнитной фазы 1%, 5%, 10% и 20%, способом перемешивания активного наполнителя и полимерной матрицы, а также механизмом полимеризации: в магнитном поле или без него. Структура полимеров была исследована с помощью оптической микроскопии. Фиксация изображений происходила при помощи цифрового USB микроскопа Микмед 5.0. Эксперименты проводились на установке для исследования магнитного отклика, разработанной и изготовленной самостоятельно на основе известных методов. Значение угла отклонения магнитоактивного кантеливера от первоначального вертикального положения определялось оптическим методом. Источником магнитного поля являлись электромагниты различных размеров с конусными наконечниками, которые были присоединены к программируемому линейному источнику питания.

Результаты. Осуществлен анализ структуры изготовленных магнитоореологических силиконовых эластомеров, зафиксировано изменение структуры образцов, которое объясняется диполь-дипольным взаимодействием микрочастиц наполнителя под воздействием внешнего магнитного поля. Также проведены исследования зависимости угла отклонения кантеливера, выполненного из силиконового полимера с магнитным наполнителем, от значения напряженности магнитного поля и структуры образцов. Полученным экспериментальным результатам предложена теоретическая интерпретация.

Вывод. Экспериментально и теоретически исследована зависимость угла наклона магнитоактивного полимерного кантеливера от величины напряженности магнитного поля, создаваемого с помощью электромагнита. Полученные результаты могут быть использованы для разработки перспективных магнитоактивных устройств перемещения и сенсоров.

Ключевые слова: магнитное поле; магнитоореологический полимер; магнитоактивный кантеливер; магнитные частицы.

Финансирование: Работа выполнена в рамках реализации программы стратегического академического лидерства "Приоритет-2030" (Соглашения № 075-15-2021-1155 и № 075-15-2021-1213), а также в рамках реализации Государственного задания Российской Федерации (№ 0851-2020-0035).

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Механические свойства силиконового полимера с магнитным наполнителем в магнитном поле / И. Ю. Сутарина, К. К. Новиков, Е. А. Соколов, К. А. Матарыкин, П. А. Ряполов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2024. Т. 14, № 3. С. 178–190. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-3-178-190>

Поступила в редакцию 02.08.2024

Подписана в печать 30.08.2024

Опубликована 24.09.2024

© Сутарина И. Ю., Новиков К. К., Соколов Е. А., Матарыкин К. А., Ряполов П. А., 2024

Mechanical properties of silicone polymer with magnetic filler in magnetic field

Irina Yu. Sutarina¹, Kirill K. Novikov¹, Evgeny A. Sokolov^{1✉},
Konstantin Matarykin¹, Petr A. Ryapolov¹

¹ Southwest State University

50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: evgeniysokolov1@yandex.ru

Abstract

Purpose. To investigate the change in the mechanical properties of a magnetorheological silicone elastomer consisting of a polymer filled with magnetite nanoparticles under the influence of an inhomogeneous magnetic field of an electromagnet.

Methods. The experiments were carried out on a magnetic response research facility developed and manufactured independently based on known methods. The value of the deflection angle of the magnetically active receiver was determined by the optical method. Two-component silicone rubbers filled with magnetite particles were studied as samples. The manufactured samples differed in geometric dimensions, magnetic phase concentrations of 1%, 5%, 10% and 20%, and polymerization mechanism. The source of the magnetic field was electromagnets of various sizes connected to power sources. The images were captured using a Micmed 5.0 digital USB microscope.

Results. The analysis of the structure of the manufactured magnetorheological silicone elastomers was carried out, as well as studies of the effect of the magnetic field strength and sample parameters on the deflection angle of the magnetically active cantilever. A theoretical interpretation of the obtained results is proposed.

Conclusion. The experimental dependence of the tilt angle of a magnetically active polymer cantilever on the equilibrium position relative to the magnitude of the magnetic field strength of the electromagnet is determined. The obtained research results can be used to develop actuators and magnetoactive sensors.

Keywords: magnetic field; magnetorheological polymer; magnetically active cantilever; deflection angle.

Funding: The work was carried out within the framework of the implementation of the strategic academic leadership program "Priority 2030" (Agreements No. 075-15-2021-1155 and No. 075-15-2021-1213), as well as within the framework of the implementation of the State Assignment of the Russian Federation (No. 0851-2020-0035).

Conflict of interest: The authors declare no apparent or potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Sutarina I.Yu., Novikov K.K., Sokolov E.A., Matarykin K.A., Ryapolov P.A. Mechanical properties of silicone polymer with magnetic filler in magnetic field. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies.* 2024;14(3):178–190. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-3-178-190>

Received 02.08.2024

Accepted 30.08.2024

Published 24.09.2024

Введение

Многофункциональные магнитомягкие композиты (магнитоактивные полимеры) – развивающаяся область, сочетающая мягкие полимерные матрицы со встроенными магнитными наполнителями [1] для создания активных материалов с уникальными свойствами [2]. Эти материалы демонстрируют быстрое и програм-

мируемое изменение формы под воздействием магнитных полей, что обеспечивает дистанционное управление [3]. Многофункциональность этих материалов открывает захватывающие возможности в области мягкой робототехники, метаматериалов [4] и биомедицинских устройств [5]. Благодаря способности реагировать на магнитные поля эти композиты можно использовать в различных отраслях про-

мышленности для повышения производительности и функциональности. Интеграция магнитомягких композитов в мягкую робототехнику позволяет разрабатывать инновационные устройства с динамическими возможностями. Эти материалы могут совершить революцию в области конфигурируемых конструкций [6], открыв новые возможности для проектирования [7].

Магнитоактивные полимеры обладают следующими свойствами:

- магнитореологический эффект [8] – влияние магнитного поля на реологию и вязкость изделия;

- магнитодеформационный [9] и магнитострикционный [10] эффекты – изменение геометрических размеров и формы образца во внешнем магнитном поле;

- эффект памяти формы [11] – возврат к первоначальному геометрическому параметрам после снятия внешних магнитных воздействий;

- магниторезистивный эффект [12] – изменение удельного электрического сопротивления образца в магнитном поле;

- магнитопьезорезистивный эффект [12] – изменение электрического сопротивления при механическом воздействии на образец в магнитном поле.

Особую роль в формировании свойств играет внутренняя структура образца, определяемая технологией синтеза образца, которая включает следующие этапы¹:

1. Подготовка и модифицирование магнитного наполнителя.

2. Приготовление силиконовой матрицы

3. Смешение матрицы и магнитного наполнителя, которое может проводиться в несколько этапов, включающих различные виды смешивания и диспергирования.

4. Дегазирование образца путем вакуумирования.

5. Напыление на стенки формы антиадгезионного состава и заливка образца в форму.

6. Полимеризация, совмещенная со структурированием магнитного наполнителя.

Исследования механических свойств магнитореологических силиконовых эластомеров являлось предметом изучения во многих работах. Были исследованы демпфирующие свойства данных систем в зависимости от параметров и компонентов исследуемого образца [13]. Сдвиговые деформации образца магнитореологического эластомера под действием магнитного поля рассматривались в работе [14]. Изучение растяжения магнитоактивных полимеров в магнитном поле [15] также является актуальной тематикой [16]. Наиболее полный обзор исследований данных систем представлен в работе [17]. С точки зрения применения данных систем интересными являются работы по исследованию датчиков вибрации и магнитного поля на основе магнитоактивных кантеливеров [18], а также использованию их в мягкой робототехнике [19], создании метаматериалов [20] и биомедицине [21].

Несмотря на значительный объем исследований по данной тематике все еще остается открытым вопрос по комплексному исследованию изменения механических свойств данных систем как при изгибе, так и при растяжении, что и ставится целью данной работы.

Материалы и методы

При синтезе магнитоактивных полимеров (МАП) были использованы магнетит железа $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ и компаунд Сила-

¹ Магнитоэлектрореологический эластомер: патент № 2603196 Рос. Федерация, МПК H01F 1/28 / Степанов Г. В., Борин Д. Ю.,

Крамаренко Е. Ю. [и др.]. № 2014152893/07 ; заявл. 25.12.2014 ; опубл. 27.11.2016.

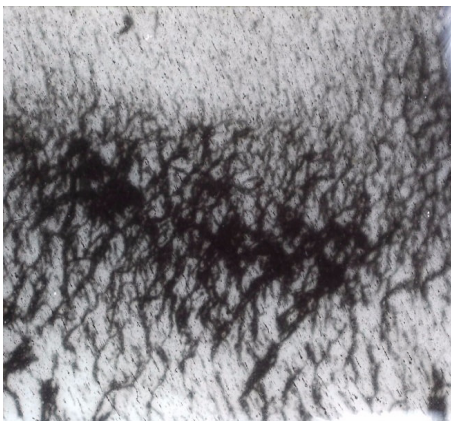
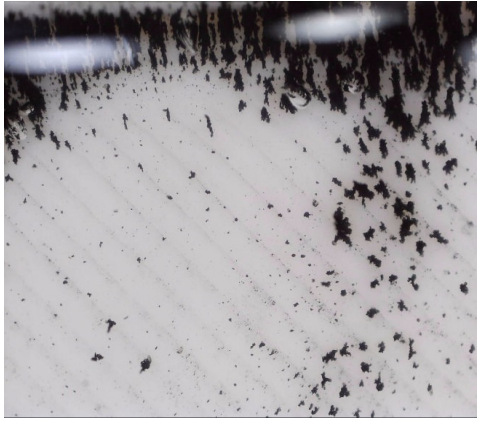
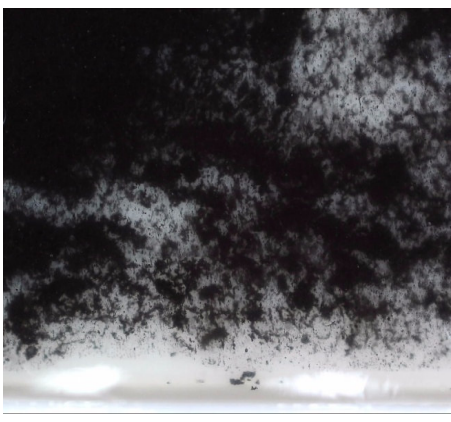
герм 2106. Данный компаунд является оптически прозрачным и предназначен для защиты изделий электронной техники, длительно работающих в среде воздуха и в условиях повышенной влажности в интервале температур от -60 до $+250^{\circ}\text{C}$. С помощью 3D-печати ABS-пластика были изготовлены формы для заливки МАП. Для диспергирования частиц по всему объему компаунда была использована ультразвуковая ванна. Для изготовления схемы-каркаса использовался 3D-принтер Picaso. Для удаления из структуры магни-

тоактивных полимеров пузырьков воздуха использовалась вакуумная камера дегазации – ёмкость, используемая для инфузий и дегазации компаундов перед тем, как они заливаются по формам.

Для проведения анализа морфологии поверхности образцов магнитоактивного полимера использовали оптическую микроскопию. В таблицах 1 и 2 представлены изображения поверхности образцов, полученных при механическом перемешивании и ультразвуковом диспергировании компаунда и магнетита железа.

Таблица 1. Изображения структуризации образцов магнитоактивного полимера различной концентрации при механическом перемешивании

Table 1. Images of the structuring of magnetically active polymer samples of different concentrations during mechanical mixing

Концентрация Concentration	Без магнитного поля Without a magnetic field	Действие магнитного поля The effect of the magnetic field
1%		
5%		

Окончание табл. 1

End of Table 1

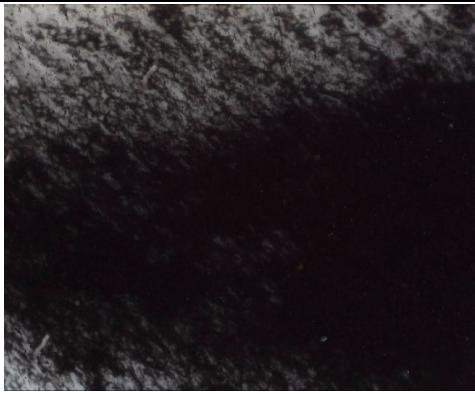
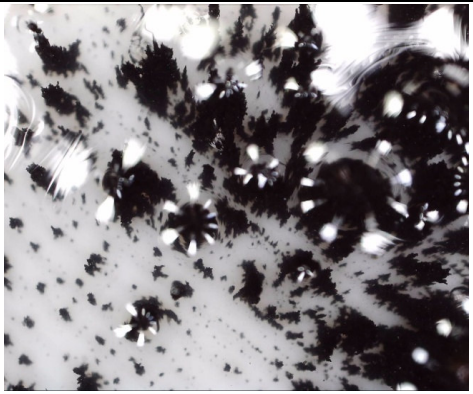
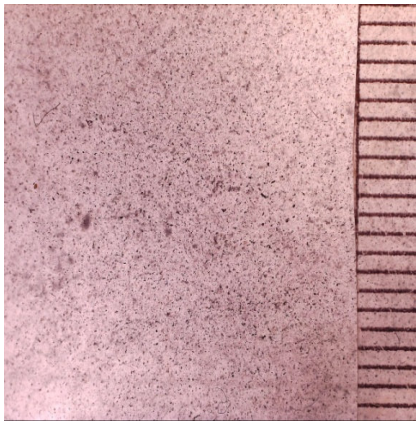
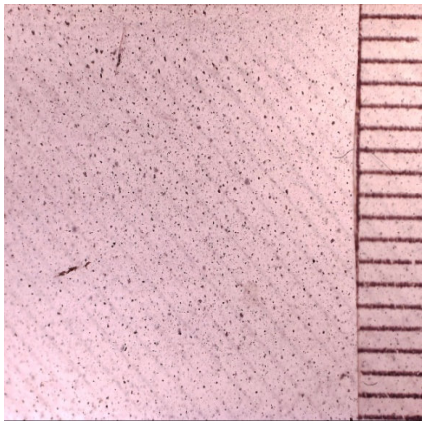
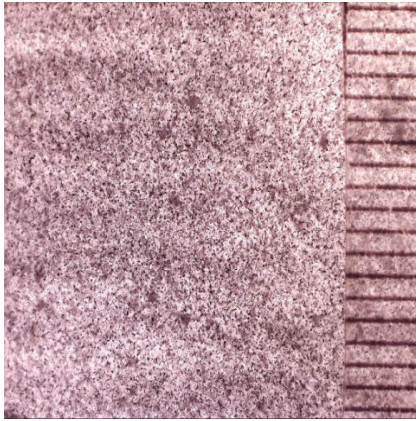
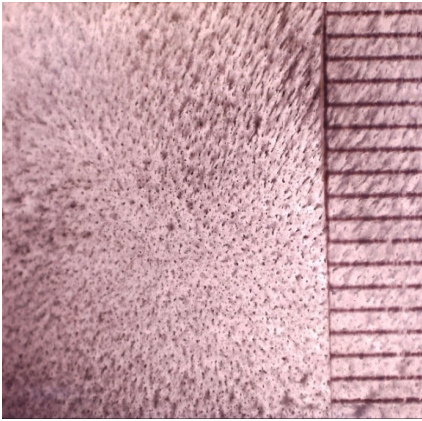
Концентрация Concentration	Без магнитного поля Without a magnetic field	Действие магнитного поля The effect of the magnetic field
10%		

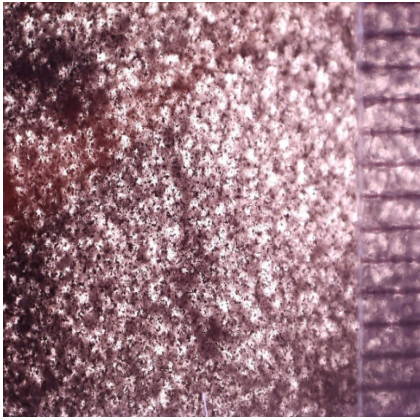
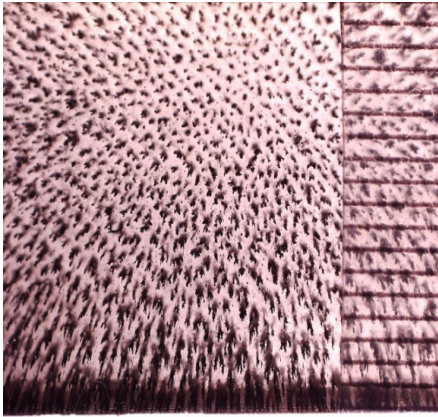
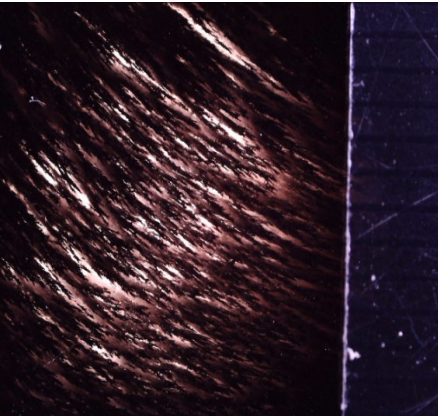
Таблица 2. Изображения структуризации образцов магнитоактивного полимера при ультразвуковом диспергировании

Table 2. Images of the structuring of magnetically active polymer samples during ultrasonic dispersion

Концентрация Concentration	Без магнитного поля Without a magnetic field	Действие магнитного поля The effect of the magnetic field
1%		
5%		

Окончание табл. 2

End of Table 2

Концентрация Concentration	Без магнитного поля Without a magnetic field	Действие магнитного поля The effect of the magnetic field
10%		
20%		

Изображения из таблиц 1 и 2 показывают, что на прозрачность исследуемых образцов магнитоактивных полимеров влияет концентрация магнитных частиц. В образцах, которые полимеризовались под действием магнитного поля, наблюдается образование структур из частиц магнетита, которые выстраиваются вдоль силовых линий магнитного поля. Частицы выстраиваются в иглоподобные структуры, агломерируются в кластеры (табл. 1) и вытягиваются вдоль линий магнитного поля. Толщина этих структур толще к магнитному полю и тоньше к свободной поверхности.

В условиях слабого механического перемешивания (см. табл. 2) структуры образуют плотные скопления частиц. В условиях ультразвукового диспергирования частицы равномерно рассредоточены, но все равно есть области неравномерного распределения этих кластеров по объему. Толщина иглолок этих кластеров гораздо меньше, а покрытие лучше. В малых концентрациях образцов кластеры не обнаружены (1–10%). Контроль высоты и периода структуры осуществляется путем изменения концентрации магнитного наполнителя и напряженности магнитного поля.

Причиной наблюдаемого образования подобных структур являются межчастичные взаимодействия магнитного наполнителя, которые носят диполь-дипольный характер, их интенсивность при этом зависит от напряженности внешнего магнитного поля.

Магнитоактивные полимеры обладают обратимой деформацией, их отклик под действием внешнего магнитного поля зависит от структуры образца. Возникновение такого эффекта в магнитных частицах, внедренных в полимерный образец, в первую очередь связано со структурными свойствами полимерной матрицы.

В ходе работы были изучены образцы на основе двухкомпонентных каучуков с различной концентрацией частиц магнетита, изготовленные с помощью ультразвукового диспергирования. При этом полимеризация образцов проходила как при действии однородного магнитного поля, так и в его отсутствие. С помощью электромагнита, который изменяет магнитное поле при прохождении электрического тока через него, измерялся магнитный отклик образцов. Для исследования магнитного отклика разработана экспериментальная установка, схема которой представлена на рисунке 1.

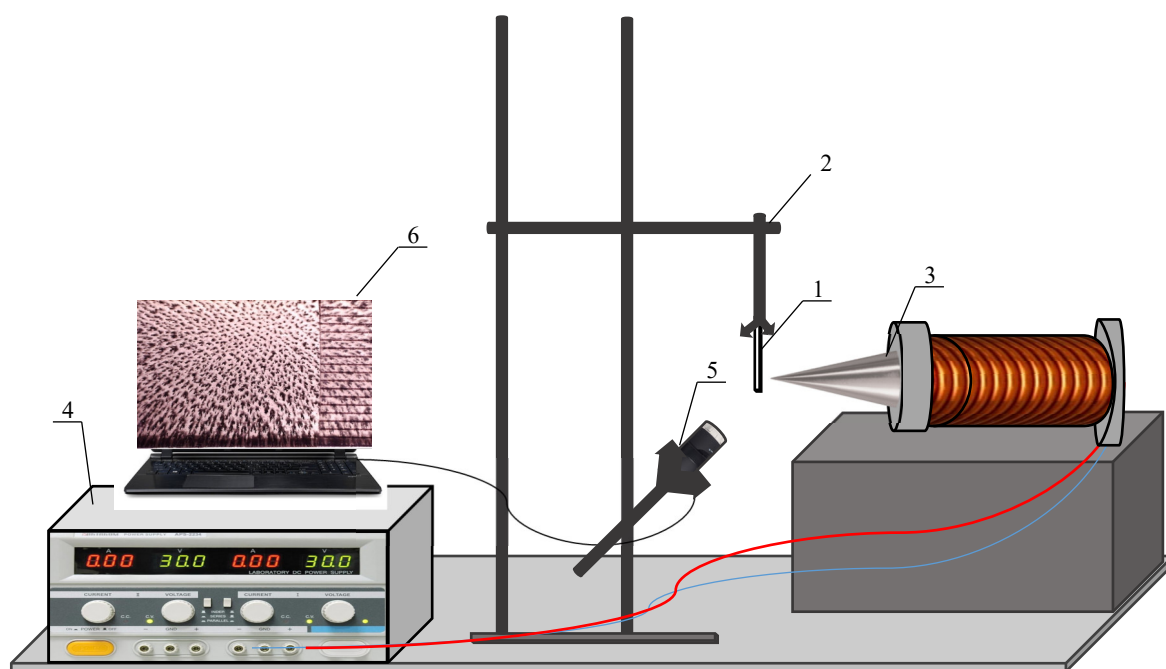


Рис. 1. Экспериментальная установка по исследованию магнитного отклика

Fig. 1. Experimental installation for the study of magnetic response

Образец магнитоактивного полимера 1 закреплен вертикально с помощью штатива 2. С помощью электромагнита с сердечником в виде конуса 3, подключенного к источнику питания 4, создается постоянное электромагнитное поле переменной величины. Значение угла отклонения фиксируется камерой цифрового USB-

микроскопа Микмед 5.0 5, который подключен к компьютеру 6.

Результаты и их обсуждение

На рисунках 2–5 представлены графики зависимостей угла отклонения образца магнитоактивного полимера от индукции приложенного магнитного поля.

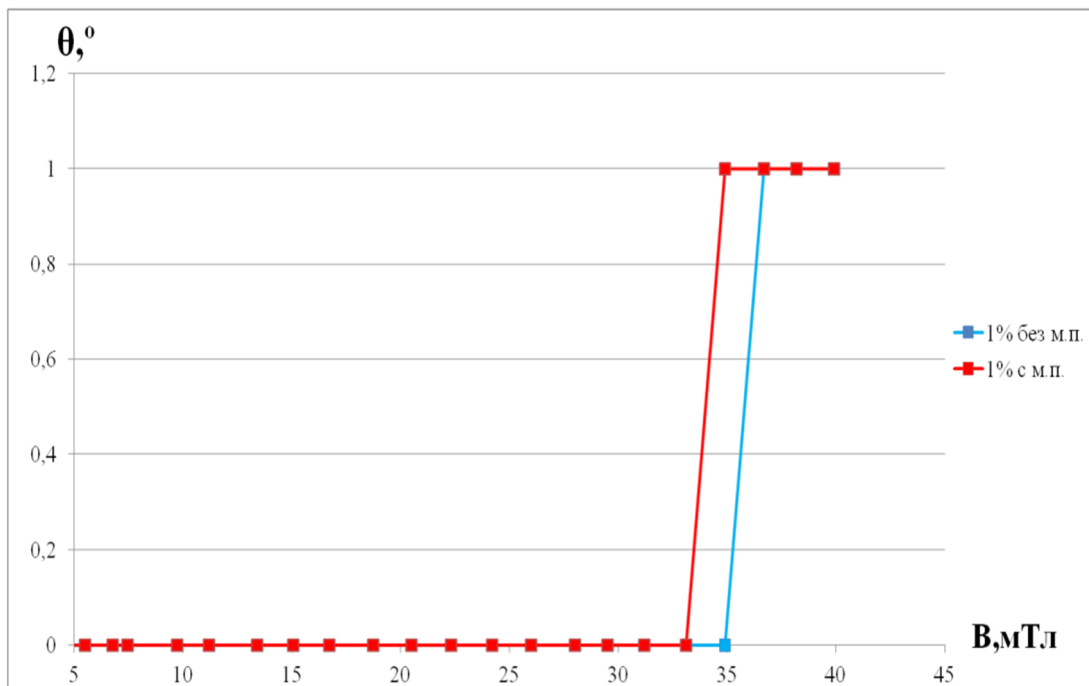


Рис. 2. График зависимости угла отклонения образца с концентрацией магнитных частиц 1% от величины магнитной индукции

Fig. 2. Graph of the dependence of the deflection angle of a sample with a concentration of magnetic particles of 1% on the magnitude of magnetic induction

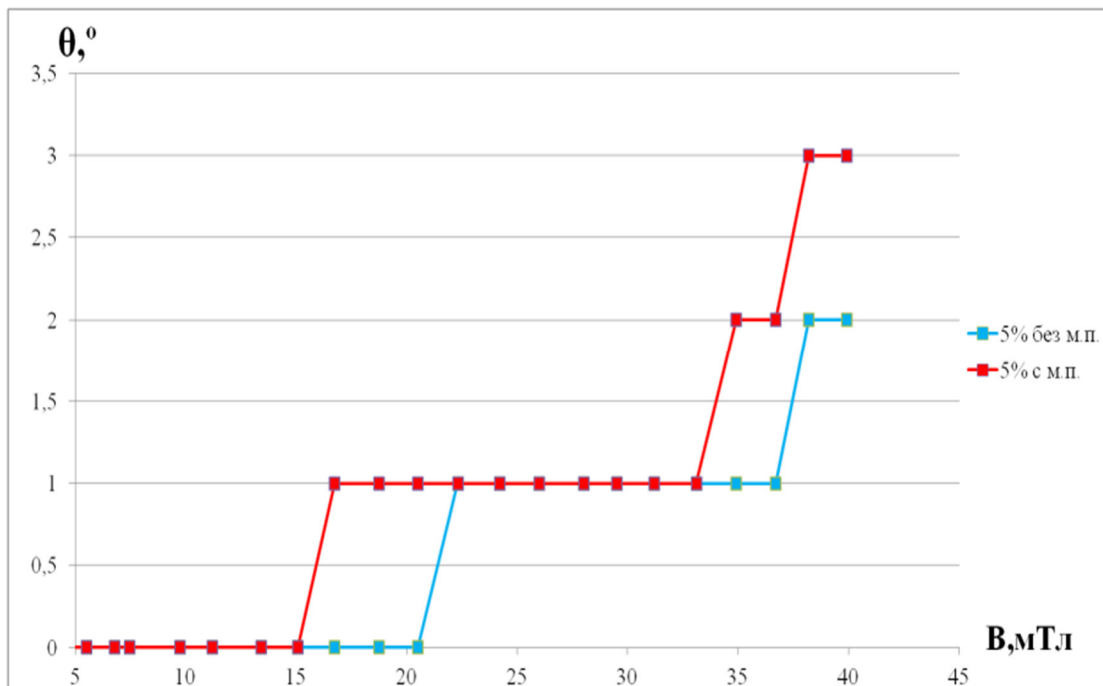


Рис. 3. График зависимости угла отклонения образца с концентрацией магнитных частиц 5% от величины магнитной индукции

Fig. 3. Graph of the dependence of the deflection angle of a sample with a concentration of magnetic particles of 5% on the magnitude of magnetic induction

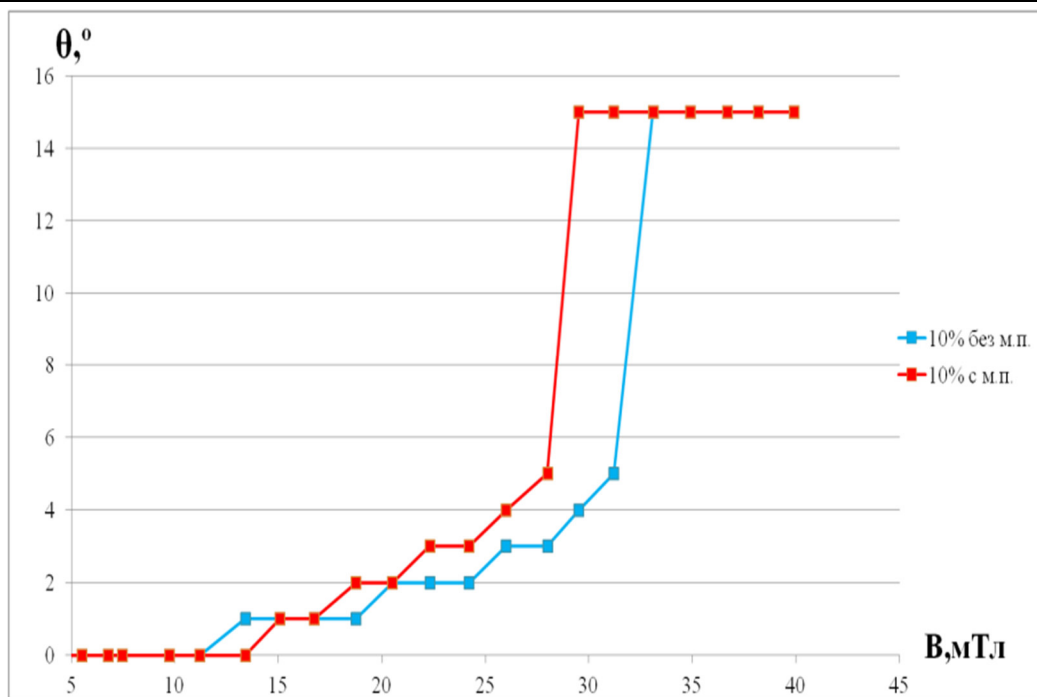


Рис. 4. График зависимости угла отклонения образца с концентрацией магнитных частиц 10% от величины магнитной индукции

Fig. 4. Graph of the dependence of the deflection angle of a sample with a concentration of magnetic particles of 10% of the magnitude of magnetic induction

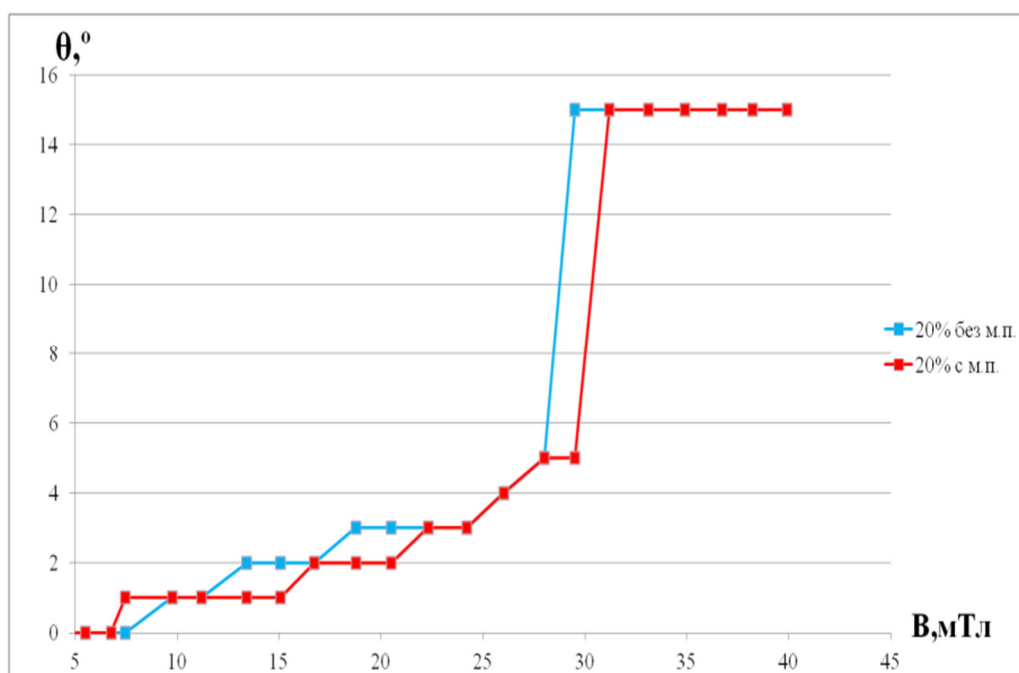


Рис. 5. График зависимости угла отклонения образца с концентрацией магнитных частиц 20% от величины магнитной индукции

Fig. 5. Graph of the dependence of the deflection angle of a sample with a concentration of magnetic particles of 20% of the magnitude of magnetic induction

Выводы

В результате синтеза было получено 14 образцов магнитоактивных полимеров с различной концентрацией магнита от 1% до 20%. Использованы технологии как ультразвукового, так и механического перемешивания. Образцы полимеризовались как в магнитном поле, так и без него.

В ходе исследования поверхности образцов магнитоактивных полимеров обнаружено структурирование частиц магнитного наполнителя, которое, в частности, проявлялось в образовании на поверхности не полностью отвердевшего полимера, помещенного во внешнее магнитное поле, игольчатых структур, которые сохранялись после полимеризации. С увеличением концентрации игольчатая структура становится более выраженной, толщина структур толще к магнитному полю и тоньше к свободной поверхности. Причиной данного структурообразования, наблюдаемого в магнитном поле, является

диполь-дипольное взаимодействие, возникающее между частицами магнитного наполнителя, возникающего во внешнем магнитном поле.

По результатам эксперимента с магнитоактивным кантеливером установлено, что для систем с большей концентрацией магнитных частиц для отклонения образца из положения равновесия необходимо приложить поле меньшей напряженности. В образцах с концентрацией магнитных частиц 10% и 20% был зафиксирован максимальный угол отклонения из положения равновесия, который составил 15°. Отличия от величины отклонения для образцов магнитоактивного полимера с одной и той же концентрацией, полимеризованных как в магнитном поле, так и без него, не наблюдалось. Результаты проведенного исследования могут быть использованы для разработки магнитомеханических систем перемещения и сенсоров.

Список литературы

1. A state-of-the-art review on magnetorheological elastomer devices / Y. Li, J. Li, W. Li, H. Du // *Smart materials and structures*. 2014. Vol. 23, no. 12. P. 123001.
2. Magnetic field-responsive smart polymer composites / G. Filipcsei, I. Csetneki, A. Szilágyi, M. Zrínyi // *Advances in Polymer Science*. 2007. Vol. 206. P. 137–189.
3. Magnetorheological elastomer-based materials and devices: state of the art and future perspectives / A. G. Díez, C. R. Tubio, J. G. Etxebarria, S. L. Mendez // *Advanced Engineering Materials*. 2021. Vol. 23, no. 6. P. 2100240.
4. Rodrigue H., Kim J. Soft actuators in surgical robotics: a state-of-the-art review // *Intelligent Service Robotics*. 2024. Vol. 17, no. 1. P. 3–17.
5. 4D Printing: The Development of Responsive Materials Using 3D-Printing Technology / P. E. Antezana, S. Municoy, G. Ostapchuk, P. N. Catalano, J. G. Hardy, P. A. Evelson [et al.] // *Pharmaceutics*. 2023. Vol. 15, no. 12, pp. 2743.
6. Advances in modeling and control of magnetorheological elastomers for engineering applications / N. K. Dhiman, S. M. Salodkar, Gagandeep, C. Susheel // *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2024. Vol. 31, no. 3. P. 1823–1865.
7. Столбов О. В., Райхер Ю. Л.. Модель магнитоактивного эластомера со структурным параметром // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. 2023. Т. 13, № 4. С. 75–87. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-13-4-75-87>
8. Магнитные, упругие, структурные и магнитодеформационные свойства магнитоэластиков / Л. В. Никитин, Л. С. Миронова, К. Г. Корнев, Г. В. Степанов // *Высокомолекулярные соединения. Серия А*. 2004. Т. 46, № 3. С. 498.

9. Степанов Г. В. Магнитодеформационный эффект и вакуумное уплотнение с помощью магнитоактивного эластомера / Г. В. Степанов, Е. Ю. Крамаренко, П. А. Стороженко // Наноиндустрия. 2022. Т. 15, № 5(115). С. 266–271.
10. Magnetostriction effects in silicone elastomers / E. S. Kelbysheva, H. H. Valiev, A. N. Vlasov, Y. N. Karnet, N. S. Snegireva, A. Y. Minaev [et al.] // IOP Conference Series: materials science and engineering : international conference of young scientists and students "Topical Problems of Mechanical Engineering", ToPME 2019. Moscow: Institute of Physics Publishing. 2020. P. 012003.
11. Столбов О. В. Моделирование эффекта псевдопластичности в магнитоактивном эластомере при сжатии и растяжении // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2022. Т. 12, № 4. С. 100–109. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-12-4-100-109>
12. Magnetoresistivity and piezoresistivity of magnetoactive elastomers / G. V. Stepanov, A. V. Bakhtiarov, D. A. Lobanov, P. A. Storozhenko // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2023. Vol. 587. P. 171313.
13. Demchuk S. A., Kuz'Min V. A. Viscoelastic properties of magnetorheological elastomers in the regime of dynamic deformation // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2002. Vol. 75, no. 2. P. 396–400.
14. Zhou G. Y. Shear properties of a magnetorheological elastomer // Smart materials and structures. 2003. Vol. 12, no. 1. P. 139.
15. Motion of ferroparticles inside the polymeric matrix in magnetoactive elastomers / G. V. Stepanov, D. Yu. Borin, Yu. L. Raikher, P. V. Melenev, N. S. Perov // Journal of Physics: Condensed Matter. 2008. Vol. 20, no. 20. P. 204121.
16. New composite elastomers with giant magnetic response / A. V. Chertovich, G. V. Stepanov, E.Yu. Kramarenko, A. R. Khokhlov // Macromolecular Materials and Engineering. 2010. Vol. 295, no. 4. P. 336–341.
17. Stepanov G. V., Storozhenko P. A. Elastic properties of a magnetoactive elastomer // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2024. Vol. 88, no. 4. P. 570–576.
18. Magnetoactive elastomers for magnetically tunable vibrating sensor systems / T. I. Y. Becker, Raikher, O. Stolbov, V. Böhm, K. Zimmermann // Physical Sciences Reviews. 2022. Vol. 7, no. 10. P. 1063–1090.
19. Ganguly S., Margel S. Fabrication and applications of magnetic polymer composites for soft robotics // Micromachines. 2023. Vol. 14, no. 12. P. 2173.
20. Multifunctional magnetic soft composites: A review / S. Wu, W. Hu, Q. Ze, M. Sitti, R. Zhao // Multifunctional materials. 2020. Vol. 3, no. 4. P. 042003.
21. Liao Z., Zoumhani O., Boutry C. M. Recent advances in magnetic polymer composites for BioMEMS: A review // Materials. 2023. Vol. 16, no. 10. P. 3802.

References

1. Li Y. Li Y., Li J., LiW., Du H. A state-of-the-art review on magnetorheological elastomer devices. *Smart materials and structures*. 2014;23(12):123001.
2. Filipcsei G., Csetneki I., Szilágyi A., Zrínyi M. Magnetic field-responsive smart polymer composites. *Advances in Polymer Science*. 2007;206:137–189.
3. Díez A.G., Tubio C.R., Etxebarria J.G., Mendez S.L. Magnetorheological elastomer-based materials and devices: state of the art and future perspectives. *Advanced Engineering Materials*. 2021;23(6):2100240.
4. Rodrigue H., Kim J. Soft actuators in surgical robotics: a state-of-the-art review. *Intelligent Service Robotics*. 2024;17(1):3–17.

5. Antezana P.E., Municoy S., Ostapchuk G., Catalano P.N., Hardy J.G, Evelson P. A., et al. 4D Printing: the development of responsive materials using 3D-printing technology. *Pharmaceutics*. 2023;15(12):2743.
6. Dhiman N.K, Salodkar S.M., Gagandeep, Susheel C. Advances in Modeling and Control of Magnetorheological Elastomers for Engineering Applications. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2024;31(3):1823–1865.
7. Stolbov O.V., Reicher Y.L. A magnetically active elastomer model with a structural parameter. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technology*. 2023;13(4):75–87. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-13-4-75-87>
8. Nikitin L.V., Mironova L.S., Kornev K.G., Stepanov G.V. Magnetic, elastic, structural and magnetodeformation properties of magnetoelastics. *Vysokomolekulyarnye soedineniya. Seriya A = High molecular weight compounds. Series A*, 2004;46(3):498. (In Russ.)
9. Stepanov G.V., Kramarenko E.Y., Storozhenko P.A. Magnetodeformation effect and vacuum sealing using a magnetically active elastomer. *Nanoindustriya = Nanoindustry*. 2022;15(5):266–271. (In Russ.)
10. Kelbysheva E.S., Valiev H.H., Vlasov A.N., Karnet Y.N., Snegireva N.S., Minaev A.Y., et al. Magnetostriction effects in silicone elastomers. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Conference of Young Scientists and Students "Topical Problems of Mechanical Engineering", ToPME 2019*. Moscow: Institute of Physics Publishing; 2020. P. 012003.
11. Stolbov O.V. Simulation of the pseudoplasticity effect in a magnetically active elastomer under compression and tension. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwestern State University. Series: Engineering and Technology*, 2022;12(4):100–109. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-13-4-100-109>
12. Stepanov G.V., Bakhtiarov A.V., Lobanov D.A., Storozhenko P.A. Magnetoresistivity and piezoresistivity of magnetoactive elastomers. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2023;587:171313.
13. Demchuk S.A., Kuz'Min V.A. Viscoelastic properties of magnetorheological elastomers in the regime of dynamic deformation. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2002;75(2):396–400.
14. Zhou G.Y. Shear properties of a magnetorheological elastomer. *Smart materials and structures*. 2003;12(1):139.
15. Stepanov G.V., Borin D.Yu., Raikher Yu.L., Melenev P.V., Perov N.S. Motion of ferroparticles inside the polymeric matrix in magnetoactive elastomers. *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2008;20(20):204121.
16. Chertovich A.V., Stepanov G.V., Kramarenko E.Yu., Khokhlov A. R. New composite elastomers with giant magnetic response. *Macromolecular Materials and Engineering*. 2010;295(4):336–341.
17. Stepanov G.V., Storozhenko P.A. Elastic properties of a magnetoactive elastomer. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2024;88(4):570–576.
18. Becker T. I., Raikher Y., Stolbov O., Böhm V., Zimmermann K. Magnetoactive elastomers for magnetically tunable vibrating sensor systems. *Physical Sciences Reviews*. 2022;7(10):1063–1090.
19. Ganguly S., Margel S. Fabrication and applications of magnetic polymer composites for soft robotics. *Micromachines*. 2023;14(12):2173.
20. Wu S., Hu W., Ze Q., Sitti M., Zhao R. Multifunctional magnetic soft composites: A review. *Multifunctional materials*. 2020;3(4):042003.
21. Liao Z., Zoumhani O., Boutry C. M. Recent advances in magnetic polymer composites for BioMEMS: A review. *Materials*. 2023;16(10):3802.

Информация об авторах / Information about the Authors

Сутарина Ирина Юрьевна, студент кафедры нанотехнологий, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: sutarinaira@gmail.com

Irina Y. Sutarina, Student of the Department of Nanotechnology, General and Applied Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: sutarinaira@gmail.com

Новиков Кирилл Константинович, студент кафедры нанотехнологий, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: knk81329@gmail.com

Kirill K. Novikov, Student of the Department of Nanotechnology, General and Applied Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: knk81329@gmail.com

Соколов Евгений Александрович, преподаватель кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: evgeniysokolov1@yandex.ru

Evgeny A. Sokolov, Lecturer at the Department of Nanotechnology, Microelectronics, General and Applied Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: evgeniysokolov1@yandex.ru

Константин Александрович Матарыкин, студент кафедры нанотехнологий, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: icego132@gmail.com

Konstantin A. Matarykin, Student of the Department of Nanotechnology, General and Applied Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: icego132@gmail.com

Ряполов Петр Алексеевич, доктор физико-математических наук, доцент, декан естественно-научного факультета, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: r-piter@yandex.ru

Petr A. Rjapolov, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Associate Professor, Dean of the Faculty of Natural Sciences, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: r-piter@yande:x.ru