

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОВОДИМОСТЬ МАГНИТОАКТИВНЫХ ЭЛАСТОМЕРОВ В ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ

Бахтияров А.В.

Младший научный сотрудник, АО «Государственный научно-исследовательский институт химических технологий элементоорганических соединений»

Степанов Г.В.

Глава лаборатории, АО «Государственный научно-исследовательский институт химических технологий элементоорганических соединений»

Лобанов Д.А.

Ведущий научный сотрудник, АО «Государственный научно-исследовательский институт химических технологий элементоорганических соединений»

Семеренко Д.А.

К.ф.-м.н., старший научный сотрудник ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана», Россия, Москва

***Аннотация.** Проведены исследования зависимостей электропроводности магнитного эластомера от магнитного поля и гидростатического давления приложенного к материалу. Работа основывается на поиске составов наполнителей, которые обеспечили бы значительную величину магнитопьезорезистивного эффекта магнитоактивного полимера. Функциональные качества материала определяются посредством измерения зависимости сопротивления от магнитного поля при разных силах давления и частотах переменного тока. Как следует из эксперимента, осколочные частицы являются наилучшим выбором наполнителя, поскольку могут в большей степени структурироваться в магнитном поле с образованием проводящих структур. Результаты исследования могут быть использованы при разработке сенсоров магнитного поля и датчиков давления.*

***Ключевые слова:** магнитопьезорезистивный эффект, магнитоактивный эластомер, магниторезистивный эффект*

ALTERNATING-CURRENT CONDUCTIVITY OF MAGNETOACTIVE ELASTOMERS

Bakhtiiarov A.V.

junior research scientist, Russian State Scientific Research Institute for Chemical Technologies of Organoelement Compounds

Stepanov G.V.

head of laboratory, Russian State Scientific Research Institute for Chemical Technologies of Organoelement Compounds

Lobanov D.A.

Ph.D., leading research scientist, Russian State Scientific Research Institute for Chemical Technologies of Organoelement Compounds

Semerenko D.A.

Ph.D., senior research fellow, Bauman Moscow State Technical University, Russia, Moscow

Annotation. Dedicated to the development of magnetic-field and pressure sensors, this work is based on the search for chemical compositions for filling powders to be used in composite materials, which would provide a significant effect and trustworthiness of indications while simple to fabricate and being produced from available ingredients. The functional quality of the material is determined by measuring the resistance of a sample as a function of external magnetic field at various alternating current frequencies and different fixed pressure forces. As is indicated by the experimental results, splinter particles are the best selection of filler, because their utilization makes it possible to bring them closer to each other thus letting the effect of a higher-conductive filling powder manifest itself. Knowledge gained in these investigations is useful for the development of magnetic-field and pressure sensors.

Keywords: *magnetopiezoresistivity, elastomer, filling powder, particle*

Одним из основных направлений работы над материалами, способными изменять проводимость под воздействием магнитного поля и механического давления, т.е. обладающих магнитопьезорезистивными свойствами, является поиск подходящих составов. Так, в рамках проекта по конструированию магниторезистивного четырёхполюсного сенсора, плоского управляемого конденсатора и магнитомеханического сенсора был испробован ряд композиций, содержащих в качестве сопутствующих добавок графит, малые количества катализатора, стеариновую кислоту, полиэферы, волокна целлюлозы и парафин, но неизменно построенных на основе силиконовых или пенополиуретановой матриц, содержащих железные частицы в качестве магнитного наполнителя [1-6]. Изучая магнитопьезорезистивный эффект в аналогичных системах, авторы [7] варьировали состав силиконовых магнитных эластомеров посредством наполнения их серебрёными и немодифицированными частицами никеля, сравнивая затем функциональные качества образцов, изготовленных изотропными или с созданной внутренней ориентацией частиц. Вопросы анизотропии и формы частиц, а также величины изучаемого эффекта в зависимости от того, частицы какого наполнителя – железа или никеля – были использованы, рассматривались в работах [8, 9].

Направленная на изучение эластичных композитных систем с магнитопьезорезистивными свойствами, настоящая работа также имела целью определить наиболее оптимальный состав, а также условия использования, при которых работу материала можно признать эффективной. Имея в распоряжении возможность оперативно синтезировать силиконовые матрицы с различной степенью жёсткости, мы, как и авторы [8, 9], сконцентрировали внимание на вопросах, связанных со спецификой наполнения. Исследование велось в направлениях, связанных с внутренней ориентацией, формой частиц и химическим составом наполняющего порошка. Опыты по изучению проводящих качеств композитов, содержащих до 82 мас.% частиц магнитного металлического наполнителя, указали на определённые особенности системы. В частности, несмотря на высокую наполненность, синтезируемые образцы демонстрировали чрезвычайно низкую проводимость в постоянном токе, по причине чего их электропроводные способности изучались в переменном токе. Поскольку каждая металлическая частица представляет собой отрезок проводника, а расстояние между любыми двумя зёрнами имеет ненулевую ёмкость, тело композита превращается в набор большого числа конденсаторов, ёмкостная проводимость которого зависит от внутренней геометрии и изменяется от приложенного воздействия и частоты тока. Также, при изменении состава наполнителя путём введения частиц железа, покрытых никелем для придания им повышенной проводимости, нами было замечено, что присутствие их в композите либо не ведёт к каким-либо изменениям, либо они разочаровывающе малы. Так, отношение значения сопротивления в поле 344 мТл к таковому

вне поля в токе с частотой 10 кГц для образца, на 80% наполненного необработанными сферическими частицами железа, оказалась даже выше (20,9) аналогичного показателя схожего композита, с никелированными частицами (11,8). Образец с внутренней анизотропией и необработанными частицами Fe внутри показывал близкий результат (12,2). Несколько лучшие показания наблюдались у материала, наполненного пластинчатыми частицами, никелированными после дробления в изопропанол (45,2). Низкой оставалась и чувствительность данных композитов к механическому давлению: вне зависимости от внутренней ориентации и наличия никеля все образцы, наполненные сферическими частицами, показывали величину отношения сопротивления без нагрузки к сопротивлению под нагрузкой 5 кгс в интервале 1,3-1,5. Добавление же к пьезорезистивной ещё и полевой компоненты сдвинуло данный интервал лишь к значениям 1,6-2,2.

Логично предположить, что силиконовый композит, по сути, представляет собой частицы наполнителя, покрытые изоляционным слоем, нивелирующим ожидаемые эффекты. В рамках данной гипотезы возникла идея провести измерения магнитопьезорезистивных свойств образцов силиконового композита, полностью или частично наполненного частицами с осколочной формой, которая могла бы обеспечить большее сближение их поверхностей во время полевого или механического воздействия. Измерениям подвергли три образца, содержащих частицы, полученные дроблением в н-гептане (Табл.).

Таблица. Коэффициент изменения R образцов при приложении механической нагрузки в предварительно установленном магнитном поле при частоте тока 10 кГц

Состав образца МАЭ	Ориентация	R ₀ / R _{5 кгс}	
		B = 0	B = 344 мТл
72 мас.% порошок Fe, дроблёный в н-гептане, никелированный	изотропный	351,2	3,5
72 мас.% смесь 1:1 порошков Fe, дроблёных в пропанол и н-гептане, никелированных	изотропный	2,1	1,3
72 мас.% порошок Fe, дроблёный в н-гептане, чистый	анизотропный	57,6	2,0

Как видно из представленных данных, выбранная стратегия оказалась верной: образцы с высоким содержанием осколочных частиц демонстрируют повышенные функциональные качества, причём в случае никелированного наполнителя магнитопьезорезистивный эффект максимален.

С целью сложить более полную картину явления зависимости сопротивления от внешнего магнитного поля измеряли в условиях постоянной силы давления на шести частотах в интервале 25 Гц – 1 МГц. Графики (рис. 1) показывают основные тенденции, сопутствующие магнитопьезорезистивному эффекту. Увеличение частоты и магнитного поля способствуют уменьшению электрического сопротивления, тем самым смещая кривую зависимости к оси абсцисс. В то же самое время, полевое воздействие ещё и «уплотняет» пучок кривых, одновременно и ослабляя пьезорезистивную составляющую явления. Также, как можно заметить, кривые при более низких полях имеют ярко выраженный минимум, что наводит на мысль о том, что датчики давления, основанные на таком материале, будут эффективны при малых полях в определённом интервале давлений. Сравнивая же значения удельного сопротивления, соответствующие нулевому и максимальному полю, при определённой частоте при нулевом давлении, можно видеть, что абсолютный магниторезистивный эффект, составляющий более 6 порядков при 25 Гц, снижается до 3,5 при частоте 1 МГц.

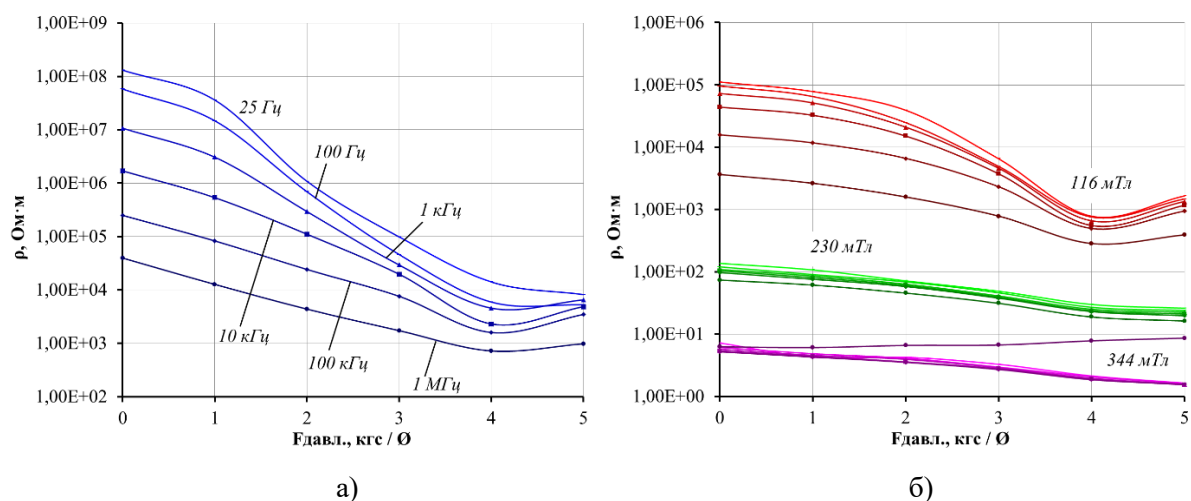


Рис. 1 Образец, содержащий 72 мас.% порошка железа, молотого в *n*-гептане и никелированного. Зависимости удельного сопротивления от давления для разных частот переменного тока: пьезорезистивный эффект вне поля (а); в различных магнитных полях при тех же частотах (б)

Полученные результаты относятся к изотропным образцам. В продолжение экспериментальной работы планируется провести серию экспериментов на анизотропных материалах.

Работа поддержана РФФИ №19-53-12039 и DFG No. Wo 3343/3-1

Список использованных источников:

1. I. Bica. Magnetorheological elastomer-based quadrupolar element of electric circuits. *Materials Science and Engineering B* 166 (2010) 94–98.
2. I. Bica & Ying Dan Liu & Hyoung Jin Choi. Magnetic field intensity effect on plane electric capacitor characteristics and viscoelasticity of magnetorheological elastomer. *Colloid Polym Sci* (2012) 290:1115–1122. DOI 10.1007/s00396-012-2627-9.
3. I. Bica. The influence of hydrostatic pressure and transverse magnetic field on the electric conductivity of the magnetorheological elastomers. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 18 (2012) 483–486.
4. I. Bica, Eugen M. Anitas, Madalin Bunoiu, Boris Vatzulik, Iulius Juganaru. Hybrid magnetorheological elastomer: Influence of magnetic field and compression pressure on its electrical conductivity. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 20 (2014) 3994–3999.
5. I. Bica. Magnetodielectric effects in composite materials based on paraffin, carbonyl iron and graphene. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 21 (2015) 1323–1327.
6. A.M. Gavrilovici, E.M. Anitas, L. Chirigiu, I. Bica, and M. L. Negrutiu. Magnetodielectric Effects in Magnetorheological Elastomers Based on Polymer Fabric, Silicone Rubber, and Magnetorheological Suspension. *Advances in Polymer Technology*. Volume 2019, Article ID 1983547, <https://doi.org/10.1155/2019/1983547>.
7. N. Kchit and G. Bossis. Electrical resistivity mechanism in magnetorheological elastomer. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 42 (2009) 105505. doi:10.1088/0022-3727/42/10/105505.
8. G. Ausanio, V. Iannotti, L. Lanotte, and L. Lanotte. Optimization of the coupling between piezoresistivity and magnetoelasticity in an elastomagnetic composite to sense a spatial gradient of the magnetic field. *Eur. Phys. J. B* (2013) 86: 51. DOI: 10.1140/epjb/e2012-30657-1.
9. G. Ausanio, V. Iannotti, E. Ricciardi, L. Lanotte, L. Lanotte. Magneto-piezoresistance in Magnetorheological elastomers for magnetic induction gradient or position sensors. *Sensors and Actuators A* 205 (2014) 235–239.