

УДК 53.043:537.622.4:537.624.9:537.636:678.842

ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ СИЛИКОНОВОГО ЭЛАСТОМЕРА С МАГНИТОЖЕСТКИМ НАПОЛНИТЕЛЕМ

© 2024 г. А. В. Бахтияров^{1,*}, Г. В. Степанов¹, Д. А. Лобанов¹, Д. А. Семеренко²,
П. А. Стороженко¹

¹Акционерное общество «Государственный Орден Трудового Красного Знамени Научно-исследовательский институт химии и технологии элементоорганических соединений», Москва, Россия

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», Москва, Россия

*E-mail: abakhtia@gmail.com

Поступила в редакцию 22.01.2024

После доработки 29.04.2024

Принята к публикации 28.06.2024

Исследована способность магнитного эластомера, состоящего из силиконового каучука и частиц сплава Nd-Fe-B с небольшой долей частиц никеля, проводить переменный ток. Установлено, что присутствие последних расширяет диапазон изменения проводимости и магнетоемкости во внешнем магнитном поле. Также отмечено свойство композита сохранять информацию о направлении первичного намагничивания, что отражается на форме кривых гистерезиса при перемене направления внешнего поля на противоположное.

Ключевые слова: магнитоактивный эластомер, композит, магнитореологический эластомер, магнитожесткий наполнитель, никель, силиконовый полимер, проводимость, сопротивление, емкость, гистерезис

DOI: 10.31857/S0367676524100056, EDN: DTLVYJ

ВВЕДЕНИЕ

Работу над новыми материалами трудно представить в отрыве от попыток найти системы с нестандартными качествами. К примеру, эластичные композиты, наделенные магнитными свойствами, демонстрируют значительное варьирование ряда параметров при воздействии на них магнитных полей. Так, помимо механической деформации [1–7], они в значительном интервале изменяют механические показатели [7–12], обретают пластичность [6, 13–17], улучшают способность пропускать видимое излучение [18], изменяют способность поглощать звуковые волны [19–21], а также демонстрируют увеличение магнетоемкости [22]. Кроме того, если частицы наполнителя проводят ток, то полевая зависимость электрических свойств материала также представляется потенциально полезной [23–27].

Рассматриваемые в данной работе системы по сути представляют собой вклеенные в толщу изолятора частицы электропроводящего ферромагнетика и ожидаемо демонстрируют гигантские значения омического сопротивления. В то же самое время любая пара частиц наполнителя образует элементарную емкость, делая материал проводником переменного тока, который

характеризуется полевыми и частотными зависимостями удельного сопротивления ρ и магнетоемкости ϵ .

При этом демонстрируемые им полевые эффекты во многом обусловлены механическими свойствами эластичного полимера, в то время как частицы металла проводят ток и взаимодействуют с магнитным полем согласно общераспространенному пониманию. Способность же их сближаться [28], переворачиваться и структурироваться в ощутимой степени определяется степенью вулканизации матрицы [29–32]. Также, на данные свойства композита влияют форма частиц, их концентрация и степень хаотичности распределения в полимере [33–37].

Изучению вопросов проводимости магнитных эластомеров посвящена серия работ. Так, авторы [38] указывают, что образцы, содержащие 50 мас.% частиц железа размером 8 мкм, в диапазоне полей 0–650 мТл снижают импеданс на 2 порядка при частоте 1 Гц, причем при 1 МГц величина данного эффекта составляет лишь $\frac{1}{2}$ порядка. Работа [39] посвящена емкостным характеристикам плоского конденсатора, сделанного на основе частиц карбонильного железа диаметром 0.12–0.75 мкм и силиконовой матрицы и демонстрирующего рост емкости

на 200 % в поле $94 \text{ кА} \cdot \text{м}^{-1}$ со значения 377 пФ при нулевом поле. В то же время, изучая полиуретановую губку, пропитанную силиконовым маслом с 40 об.% частиц железа размером 4.5—5.4 мкм, авторы [40] отмечают, что в частотном диапазоне 0.02—200 кГц образец с размерами $60 \times 70 \times 40 \text{ мм}^3$ показывает вариацию емкости в пределах 23—1746 пФ, а сопротивления — в диапазоне от 938 Ом вне поля и частоте 20 Гц до 1.4288 МОм при $100 \text{ кА} \cdot \text{м}^{-1}$ и той же частоте.

Стоит, однако, заметить, что интерес к чувствительным к магнитному полю электропроводным эластичным композитам в целом фокусируется на железных и реже никелевых наполнителях, что с одной стороны заставляет исследователей, рассматривающих иные системы, полагаться на собственные опыт и интуицию, а с другой, увеличивает ценность их работы. Так, целью настоящего исследования было изучение полевых зависимостей удельного сопротивления и магнитоемкости магнитоактивных эластомеров (МАЭ), наполненных магнито жесткими частицами сплава Nd-Fe-B неправильной формы и их смесью с никелем.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Изготовление образца

Магнитоактивный эластомер получали согласно стандартной технологии [41], включающей введение частиц наполнителя в концентрации 80 мас.% в смесь винильной и гидридной компонент силиконового полуфабриката с вакуумированием суспензии и ее полимеризацией при 120°C в виде тонкого слоя. При изготовлении анизотропных образцов прикладывалось магнитное поле порядка 100 мТл. Наполнителями служили порошки, содержащие частицы сплава Nd-Fe-B и карбонильного никеля, смешанные в массовом соотношении 4:1 (табл. 1). В предварительном опыте образец, наполненный лишь частицами Nd-Fe-B,

во всем экспериментальном диапазоне магнитных полей демонстрировал исключительно низкую чувствительность к полю, а его параметры были на пределе чувствительности прибора. Поэтому для улучшения отклика композита на полевое воздействие в состав были добавлены мелкие частицы никеля (табл. 1). Продукт полимеризации тестировали на эластичность, после чего проводили измерения электрофизических параметров. Для этого делались сборки в виде плоских конденсаторов, представляющие собой вырезанную из полимеризата пластинку квадратной формы с металлическими обкладками, приложенными к обеим сторонам. Параметры образцов представлены в табл. 2.

Измерения

Все экспериментальные работы проводились с помощью стандартной установки, включающей электромагнит с диаметром полюсов 80 мм и расстоянием между полюсами 13 мм. Образец закреплялся в центре между полюсами. При этом однородность магнитного поля в области расположения образца была не хуже 99 %. Электрические параметры образца регистрировались измерителем иммитанса Е7—20 (амплитуда сигнала 1 В), связанного с персональным компьютером с помощью установленной программы. Через компьютер задавали силу тока, подаваемого на катушки электромагнита источником АКИП-1118, и записывали в файл данные, получаемые от измерителя иммитанса [42]. Посредством перемены местами клемм проводов, соединяющих катушки с источником постоянного тока, устанавливалась желаемая полярность поля, создаваемого электромагнитом. По абсолютной величине магнитная индукция варьировалась от 0 до 1170 мТл. В режиме параллельной схемы подключения образца измеритель иммитанса передавал на компьютер снимаемые при различных частотах значения емкости конденсатора

Таблица 1. Компоненты наполнителей.

Компонента	Частицы	Форма и размер
Магнито жесткие	Сплав Nd-Fe-B	Пластинчатая Фракция мелкая, $\leq 50 \text{ мкм}$
		Пластинчатая Фракция средняя, 50—70 мкм
Магнитомягкие	Никель карбонильный	Звездчатая $\leq 5 \text{ мкм}$

Таблица 2. Составы образцов магнитного эластомера.

Образец №	1	2	3
Фракция сплава Nd-Fe-B	Мелкая	Мелкая	Средняя
Структурированность	Изотропный	Анизотропный	Анизотропный
Толщина, мм	1.2	1.4	1.4
Упругость по изготовлению E_0 , кПа	40	40	50
Число предварительных циклов в антипараллельном внешнем поле	19	11	10

(C) и активного сопротивления слоя МАЭ (R). При осуществлении одного цикла измерений, увеличивая ток до установленного максимума, а затем снижая его до нуля, руководящая процессом программа позволяла задать как величину приращения и диапазон значений тока на катушках, так и длительность ожидания после очередного шага и количество точек для усреднения. В рамках описываемого эксперимента в каждом цикле данные получались при выдержке не короче 5 секунд и усреднении по трем точкам.

В работе основное внимание уделено проблеме перестроения структур магнитожестных частиц, происходящего после смены полярности поля с антипараллельной вектору изначального намагничивания на параллельную. При этом на момент тестирования все использованные образцы уже подверглись намагничиванию в поле антипараллельной ориентации в некотором количестве циклов (табл. 2), благодаря чему отправные их свойства можно считать устоявшимися. Изучения «привыкания» материала к перемагничивающему воздействию состоит в отслеживании изменений в конфигурациях петель гистерезиса удельного сопротивления ρ и магнитоёмкости ϵ во времени. Все результаты получались при частоте проходящего через образец тока 1 кГц.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Измерения на всех опытных образцах проходили по одной схеме (рис. 1). Перед переключением направления внешнего поля в параллельную ориентацию проводилось поверочное измерение — цикл 0. В серии последующих измерений отслеживалось изменение формы кривых $\rho(B)$ и $\epsilon(B)$ от цикла к циклу (циклы А, В, С и т. д.). На основании полученной

картины делались выводы о протекании адаптационных процессов в материале.

Выбирая поведение изотропного образца № 1 в качестве модельного, следует отметить, что интерпретация поведения МАЭ со смешанным наполнителем делается на основании знаний, полученных на более ранних этапах исследования [41, 43–48]. Свойства материала можно изменять, например, увеличивая концентрацию электропроводящего наполнителя [49], а можно, как в нашем исследовании, прикладывая магнитное поле. Так, согласно сложившемуся пониманию, матрица образца наполнена фракционированными змеевидными цепеподобными образованиями. Такая остаточная форма структурирования стабилизирована магнитным взаимодействием частиц Nd-Fe-B, на которые в предыдущих измерениях оказывалось антипараллельное полевое воздействие. Ввиду того факта, что подобные материалы сохраняют информацию о наиболее интенсивном намагничивании [48], после снятия полевого воздействия, осуществленного «в обратном направлении», частицы остаются собранными в цепи, искривленными упругими силами деформированного полимера. В использованных образцах картина усложнена еще и присутствием магнитомягких частиц, также участвующих в структурировании, дополнительно деформируя матрицу.

На ветви прямого хода петли $\rho(B)$ цикла 0 наблюдается небольшая выпуклость с максимумом при 70 мТл (рис. 1а); аналогичная же область на кривой $\epsilon(B)$ демонстрирует практически горизонтальный участок с очень слабо выраженным минимумом (рис. 1б). Небольшое снижение электропроводности, сопровождаемое почти постоянным значением емкостного параметра, наводит на мысль о разрыве части цепеподобных структур вследствие вращения частиц без

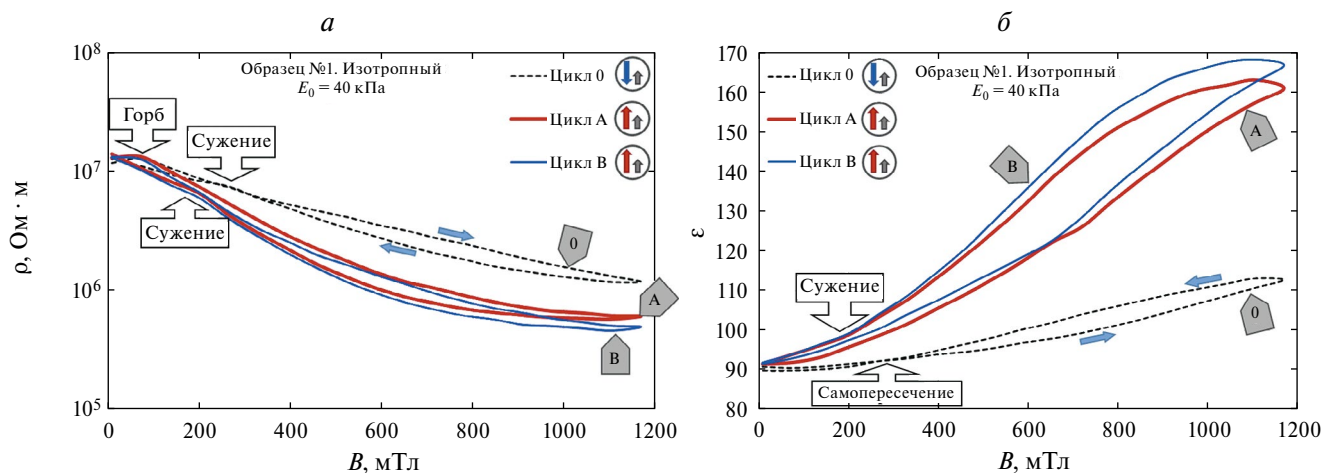


Рис. 1. Кривые полевых зависимостей удельного активного сопротивления ρ (а) и магнитоёмкости ϵ (б) изотропного образца МАЭ № 1 при перемагничивании по схеме «антипараллельная ориентация → параллельная ориентация». На данном и следующих рисунках круглыми значками показана ориентация внешнего поля (большая стрелка) относительно направления изначальной намагниченности образца (маленькая стрелка) при прохождении образцом очередного цикла.

существенного их смещения. При этом дальнейшее усиление внешнего поля собирает частицы в кольца, а затем — в новые цепи [43, 46, 48], что уже не может происходить без смещения и деформации полимера, что проявляется в виде монотонного убывания кривой сопротивления и возрастания кривой магнитоемкости. Интересно тем не менее заметить, что в области 250—330 мТл на ветви прямого хода присутствует небольшая выпуклость (рис. 1а). На ней нет четко сформированного экстремума, однако, вызвавшее ее появление замедление снижения сопротивления может быть связано со стерическим фактором, возникающим при сборке в новые структуры пластинчатых магнито жестких и звездчатых магнитомягких частиц, захватывающих участки матрицы и создающих «стенные» зоны [50]. Минувшая выпуклость, сопротивление уменьшается вдоль участка, вплоть до точки 1000 мТл имеющего высокую схожесть с прямой линией и лишь в конечной области ветви прямого хода демонстрирующего небольшую вогнутость для выхода в насыщение. Магнитоемкость же увеличивается с небольшим ускорением вплоть до 700 мТл, после чего до самого конца ветви возрастает вдоль прямого участка (рис. 1б), что, скорее всего, свидетельствует о достижении некоего баланса между интенсивностью магнитного взаимодействия частиц и упругими силами в матрице при имеющейся степени деформации. Начало ослабления полевого воздействия сопровождается небольшим всплеском значения магнитоемкости с максимумом при 1100 мТл (рис. 1б). Притом, что аналогичная область на ветви обратного хода удельного сопротивления представляет собой практически горизонтальный участок (рис. 1а), можно сделать предположение, что эта выпуклость отражает возможность частиц смещаться внутри уже сформированных цепеподобных структур. В любом случае, в экспериментальной работе нами уже было замечено, что подобные максимумы наблюдаются в системах, содержащих никель [45]. Далее магнитоемкость монотонно снижается, причем в интервале от 1000 до 300 мТл практически линейно. В точке же 300 мТл наблюдается самопересечение, благодаря которому петля обретает форму «восьмерки», а финальный участок ветви обратного хода пролегает несколько ниже начального участка ветви прямого хода (рис. 1б). Учитывая тот факт, что, монотонно возрастая до финальной точки, ветвь обратного хода удельного сопротивления также, как и ветвь прямого хода, имеет в области 250—330 мТл выпуклость (рис. 1а), что приводит к сужению петли на данном участке, можно сделать предположение, что в целом порядок разрушения структур внутри композита соответствует обращенному порядку их сборки, когда спрямленные цепи, разрушаясь, превращаются в кольца, а затем формируют новые змеевидные структуры. На это также указывает и общая узость наблюдаемых петель гистерезиса. Интересно заметить, что место сужения петли сопротивления соответствует области самопересечения петли магнитоемкости

(рис. 1). При этом тот факт, что финальная точка оказалась несколько ниже стартовой, скорее всего, следует отнести на счет релаксационных эффектов в деформированной матрице, сопутствующих восстановлению змеевидных цепей [46].

Воздействие на образец усиливающимся полем, сонаправленным с вектором первичного намагничивания, разрушает змеевидные агломераты, разворачивая частицы, которые перед тем, как выстроиться «правильно» также собираются в кольца. В результате уменьшения степени деформированности матрицы, дальнейшие структурные перестроения внутри образца происходят в условиях большей вольности перемещения частиц, что находит отражение в конфигурации петель гистерезиса в циклах А и В (рис. 1). Так, результатом смены полярности стало расширение диапазона вариации значений удельного сопротивления с 1 порядка в цикле 0 до 1.33 и 1.43 порядков в циклах А и В соответственно и магнитоемкости со значения 23 % до 76 % и 82 % соответственно. Также увеличилась изогнутость линий. В частности, петля гистерезиса $\rho(B)$ из клиновидной перешла в серповидную (рис. 1а), а петля $\epsilon(B)$ значительно расширилась, сохранив при этом горб на ветви обратного хода с максимумом при 1100 мТл (рис. 1б). Данный факт является дополнительным подтверждением версии о том, что существует ненулевая возможность частиц перемещаться внутри цепеподобных структур при сильных полях, что может мало влиять на проводимость, но быть существенным для вариации емкости. Также можно видеть, что сужение, вызванное выпуклостями на обеих ветвях петли $\rho(B)$ в цикле 0, сместилось в область более слабых полей 150—250 мТл таким же образом, как и соответствующая область на петле $\epsilon(B)$, в которой наблюдалось самопересечение, превратившееся в циклах А и В в сужение (рис. 1). В то же время скачок удельного сопротивления с максимумом при 70 мТл на ветви прямого хода от цикла 0 к циклу В не претерпел заметных изменений, что свидетельствует в пользу предположения, что вращательное движение совершается частицами в этой области полей при любом распределении изначальных напряжений в матрице. Также нужно заметить, что петли гистерезиса магнитоемкости циклов А и В смыкаются в точке, совпадающей со стартовой точкой петли цикла 0.

Говоря об адаптации, выражающейся в различиях между петлями циклов А и В, следует заметить, что при практическом совпадении кривых $\rho(B)$ в области 0—100 мТл, в более сильных полях петля цикла В проходит ниже, чем цикла А (рис. 1а). Схожая тенденция заметна и у петель $\epsilon(B)$, ибо за исключением точки при нулевом поле, петля цикла В всецело соответствует более высоким значениям (рис. 1б). При этом, в области 0—200 мТл ветвь прямого хода в цикле А демонстрирует вогнутость без минимума, располагаясь более близко к аналогичному участку петли цикла 0, чем петля цикла В, которая на участке 0—400 мТл заметно более узкая. Данную особенность

можно объяснить уничтожением змеевидных цепей в процессе выполнения цикла А, чего уже не происходит в следующем цикле.

При этом узость петли гистерезиса $\rho(B)$, позволяет предположить, что и после перемагничивания порядок разрушения цепеподобных образований в изотропном МАЭ в целом соответствует обращенному порядку их образования.

Анизотропный эластомер представлен образцами с более мелкими и более крупными частицами (табл. 2). Различающаяся при этом степень их подвижности, а вместе с этим и эластичности, вкупе со структурированностью расширяет число сценариев поведения (рис. 2 и 3). Так, в цикле 0, образец № 2 демонстрирует снижение сопротивления на 1.4 порядка и магнитоемкости — на 41 %, а образец № 3 — соответственно на 1 порядок и 21 %. Анализируя кривые, полученные для образца № 2 (рис. 2), следует отметить, что при всей их сложности, в них просматриваются родство с поведением изотропного аналога, находящегося под воздействием внешнего поля с антипараллельной изначально намагничиванию направленностью. В частности, как и образец № 1 в цикле 0, образец № 2 во всех циклах демонстрирует петлю $\varepsilon(B)$ с самопересечением (рис. 2б). Также, ветвь прямого хода цикла 0 при 70 мТл имеет незначительную вогнутость, которая в циклах А, В, С и D превращается в минимум, дрейфующий от 150 мТл до нулевого поля. Среди отличий от образца № 1 можно назвать появление на петлях $\varepsilon(B)$ циклов А–D ярко выраженного максимума, который дрейфует от 700 мТл до 260 мТл, причем эта выпуклость с замедлением уменьшается от цикла к циклу. Здесь следует заметить, что появление данной выпуклости выглядит как попытка образца продолжать вести себя, как и в цикле 0, несмотря на смену полярности внешнего воздействия. Тем не менее, прогрессирующее внутреннее перестроение, очевидно, нивелирует

эту тенденцию. В остальном петли циклов В, С и D практически совпадают, а обратная ветвь петли магнитоемкости цикла А хорошо к ним приближается. Среди отличий от неструктурированного образца — также и то, что петли гистерезиса $\rho(B)$ циклов 0–D стабильно самопересекаются в трех точках (рис. 2а), причем наибольшая изогнутость ветви прямого хода соответствует интервалу полей, в котором наблюдается вышеупомянутая выпуклость на петлях $\varepsilon(B)$ (рис. 2б). Вместе с тем, кривые $\rho(B)$ циклов А–D демонстрируют такую же тенденцию к совпадению, как и кривые $\varepsilon(B)$. Такому поведению может способствовать ряд причин. Во-первых, значительным фактором остается то, что в только что изготовленных анизотропных образцах структурированное состояние соответствует недеформированной матрице, а многократное перемагничивание в обратном направлении перестраивает структуры в змеевидные, деформируя полимер. Также, изначальная собранность в цепеподобные структуры снижает возможность перемещаться, что выражается в необходимости серии циклов для перестроения и, как результат, дрейфующих особых участков на кривых. В то же самое время, как следует из того, что петли в циклах А–D расположены с «неправильной» стороны петель цикла 0 (рис. 2), свидетельства о снижении характеристик, намагниченности в поле, направленном антипараллельно, очевидно обеспечивает большее высокую степень структурированности частиц, чем в поле, ориентированном параллельно.

Упомянутая ранее пониженная функциональность образца № 3 на цикле 0 в сравнении со своим аналогом, содержащим более мелкую фракцию магнитожесткой компоненты, скорее всего, есть результат стерического эффекта, проявляющегося при укрупнении частиц. Собранные в цепеподобные образования в процессе приготовления, более крупные частицы имеют сниженную подвижность,

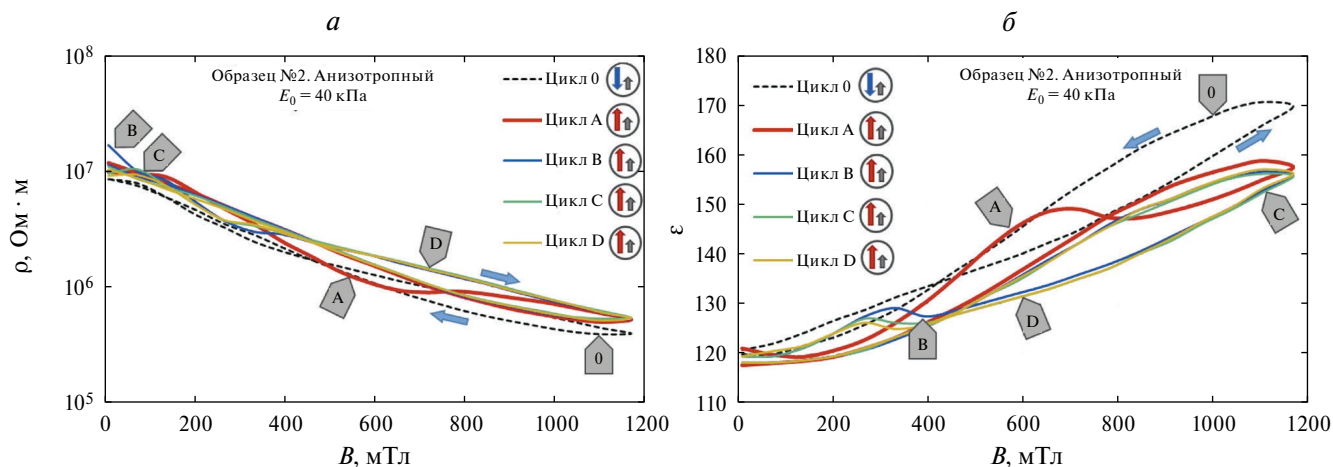


Рис. 2. Кривые полевых зависимостей удельного активного сопротивления ρ (а) и магнитоемкости ε (б) анизотропного образца МАЭ № 2 при перемагничивании по схеме «антипараллельная ориентация → параллельная ориентация».

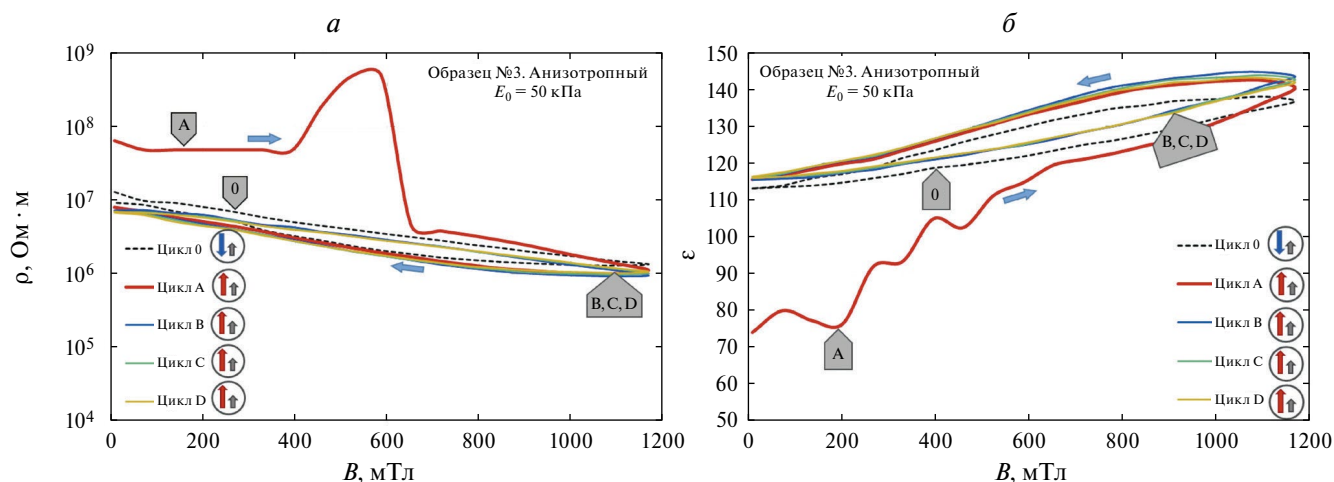


Рис. 3. Кривые полевых зависимостей удельного активного сопротивления ρ (а) и магнетности ϵ (б) анизотропного образца МАЭ № 3 при перемагничивании по схеме «антипараллельная ориентация → параллельная ориентация».

что выражается в консервации показателей. Как следует из графиков, приведенных на рис. 3, конфигурации петель гистерезиса как $\rho(B)$, так и $\epsilon(B)$, вполне «классическая». Небольшое сужение петель цикла 0 в области 0—100 мТл, скорее всего, является проявлением вращательного движения, которое может подавляться упругими силами напряженной матрицы. Оказание на образец перемагничивающего действия, очевидно, вызывает некоторые перестроения, которые по причине сниженной возможности частиц двигаться происходят лишь на ветви прямого хода первого цикла А. Это выражается в резком ухудшении характеристик в полях до 700 мТл (рис. 3), после чего новые структуры, скорее всего, можно считать сформированными, на что указывает тот факт, что стабилизация характеристик происходит уже на обратной ветви цикла А. А также то, что перемагничивающее поле не приводит к каким-либо существенным вариациям размера диапазона удельного сопротивления и магнетности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, изучены процессы перестроения, происходящих в образцах магнитного эластомера с магнитоэластичной компонентой в условиях смены полярности внешнего магнитного поля с антипараллельной вектору изначального намагничивания на параллельную. В результате было установлено, что присутствие частиц никеля делает композит чувствительным к магнитному полю и снижает его сопротивление. Также было показано, что при концентрации смешанного наполнителя 80 мас.% более широкий диапазон вариации удельного сопротивления и магнетности обеспечивается более высокой дисперсностью частиц. И подвижность в случае изотропного материала и состояние намагниченности в поле антипараллельной ориентации в случае

анизотропного материала ведет к схожему эффекту. Также, требуется несколько перемагничивающих циклов для достижения стабильных показателей.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-53-12039).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, который мог бы возникнуть при публикации данного материала, — финансового или какого-либо еще.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Raikher Yu.L., Stolbov O.V. // J. Magn. Magn. Mater. 2003. V. 258—259. P. 477.
2. Crippa F., Moore T.L., Mortato M. et al. // J. Magn. Magn. Mater. 2017. V. 427. P. 212.
3. Gundermann T., Günther S., Borin D., Odenbach S. // J. Phys. Conf. Ser. 2013. V. 412. Art. No. 012027.
4. Feng J., Xuan S., Ding L., Gong X. // Composites A. 2017. V. 103. P. 25.
5. Diermeier A., Sindesberger D., Krenkel L. et al. // Open Mech. Eng. J. 2018. V. 12. P. 192.
6. Nikitin L.V., Stepanov G.V., Mironova L.S., Gorbunov A.I. // J. Magn. Magn. Mater. 2004. V. 272—276. P. 2072.
7. Lee D., Lee M., Jung N. et al. // Smart Mater. Struct. 2014. V. 23. Art. No. 055017.
8. Borin D., Stepanov G., Musikhin A. et al. // Polymers. 2020. V. 12. Art. No. 2371.
9. Borin D.Yu., Stepanov G.V. // J. Optoelectron. Adv. Mater. 2013. V. 15. No. 3—4. P. 249.
10. Carlson J.D., Jolly M.R. // Mechatronics. 2000. V. 10. P. 555.

11. *Stepanov G., Borin D., Odenbach S.* // J. Phys. Conf. Ser. 2009. V. 149. Art. No. 012098.
12. *Kwon S.H., Lee J.H., Choi H.J.* // Materials. 2018. V. 11. No. 6. Art. No. 1040.
13. *Böse H., Röder R.* Magnetorheological elastomers and use thereof. US Patent No. 7608197, cl. H01F1/447, F16F1/361. 2005.
14. *Stepanov G.V., Borin D. Yu., Raikher Yu.L. et al.* // J. Phys. Cond. Matter. 2008. V. 20. Art. No. 204121.
15. *Melenev P., Raikher Yu., Stepanov G. et al.* // J. Intell. Mater. Syst. Struct. 2011. V. 22. No. 6. P. 531.
16. *Lovšin M., Brandl D., Glavan G. et al.* // Polymers. 2021. V. 13. Art. No. 4422.
17. *Urban M., Strankowski M.* // Materials. 2017. V. 10. No. 9. Art. No. 1083.
18. *Shevchenko V.G., Stepanov G.V., Kramarenko E.Y.* // Polymers. 2021. V. 13. Art. No. 2002.
19. *Dirisamer F., Cakmak U., Marth E., Major Z.* // Acta Polytech. CTU Proc. 2016. V. 3. P. 7.
20. *Yu K., Fang N.X., Huang G., Wang Q.* // Adv. Mater. 2018. V. 30. No. 21. Art. No. 1706348.
21. *Li Y., Li J., Li W., Samali B.* // Smart Mater. Struct. 2013. V. 22. Art. No. 035005.
22. *Semisalova A.S., Perov N.S., Stepanov G.V. et al.* // Soft Matter. 2013. V. 9. P. 11318.
23. *Kchit N., Bossis G.* // J. Phys.: Cond. Matter. 2008. V. 20. Art. No. 204136.
24. *Ghafoorianfar N., Gordaninejad F.* // Proc. SPIE. 2015. V. 9435. Art. No. 94351E.
25. *Ye W.Q., Deng Y.M., Wang W.* // Appl. Mech. Mater. 2010. V. 37–38. P. 444.
26. *Xuli Z., Yonggang M., Yu T.* // Smart Mater. Struct. 2010. V. 19. Art. No. 117001.
27. *Yu W., Shouhu X., Bo D. et al.* // Smart Mater. Struct. 2016. V. 25. Art. No. 025003.
28. *Gundermann Th., Odenbach S.* // Smart Mater. Struct. 2014. V. 23. Art. No. 105013.
29. *Wei Z., Xing-Long G., Jian-Feng L. et al.* // Chin. J. Chem. Phys. 2009. V. 22. No. 5. P. 535.
30. *Yanceng F., Xinglong G., Shouhu X. et al.* // Ind. Eng. Chem. Res. 2013. V. 52. No. 2. P. 771.
31. *Narayan S., Lunt M., Kubick D.J. et al.* Electrically conductive silicones and method of manufacture thereof. US Patent 6902688, cl. H01B1/22, C08K9/02. 2001.
32. *Степанов Г.В., Крамаренко Е.Ю., Перов Н.С. и др.* // Вест. ПНИПУ. Механика. 2013. № 4. С. 106.
33. *Li J., Gong X., Xu Z.B., Jiang W.* // Int. J. Mat. Res. 2008. V. 99. No. 12. P. 1358.
34. *Günther D., Borin D. Yu., Günther S., Odenbach S.* // Smart Mater. Struct. 2012. V. 21. Art. No. 015005.
35. *Opie S., Yim W.* // Proc. IMECE2007 (Seattle, 2007) P. 99.
36. *Woods B.K.S., Wereley N., Hoffmaster R., Nerse-ssian N.* // Int. J. Mod. Phys. B. 2007. V. 21. No. 28–29. P. 5010.
37. *Филиппова Ю.А., Папугаева А.В., Панов Д.В., и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2023. Т. 87. № 12. С. 1813; *Filippova Yu.A., Papugaeva A.V., Panov D.V. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2023. V. 87. No. 12. P. 1885.
38. *Wang X., Gordaninejad F., Calgar M. et al.* // J. Mech. Des. 2009. V. 131. No. 9. Art. No. 091004.
39. *Bica I.* // J. Ind. Eng. Chem. 2009. V. 15. P. 609.
40. *Bica I., Anitas E.M., Averis L.M.E.* // J. Ind. Eng. Chem. 2015. V. 27. P. 334.
41. *Stepanov G.V., Borin D. Yu., Bakhtiarov A.V., Storozhenko P.A.* // J. Magn. Magn. Mater. 2020. V. 498. Art. No. 166071.
42. *Stepanov G.V., Semerenko D.A., Bakhtiarov A.V., Storozhenko P.A.* // J. Supercond. Nov. Magn. 2013. V. 26. P. 1055.
43. *Stepanov G.V., Borin D. Yu., Bakhtiarov A.V. et al.* // Smart Mater. Struct. 2021. V. 30. Art. No. 015023.
44. *Borin D., Stepanov G., Dohmen E.* // Arch. Appl. Mech. 2019. V. 89. P. 105.
45. *Stepanov G.V., Bakhtiarov A.V., Lobanov D.A. et al.* // SN Appl. Sci. 2022. V. 4. P. 178.
46. http://magnetolab.ru/page_nauka_elastomer.html.
47. *Stepanov G.V., Borin D. Yu., Bakhtiarov A.V. et al.* // J. Magn. Magn. Mater. 2020. V. 498. Art. No. 166125.
48. *Stepanov G.V., Borin D. Yu., Bakhtiarov A.V. et al.* // Phys. Sci. Rev. 2022. V. 7. No. 10. P. 1141.
49. *Вызулин С.А., Бузько В.Ю., Каликинцева Д.А., и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 9. С. 1322; *Vyzulin S.A., Buz'ko V.Yu., Kalikintseva D.A. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 9. P. 1019.
50. *Tong Y., Dong X., Qi M.* // Soft Matter. 2018. V. 14. P. 3504.

Electroconductivity of silicone-based elastomer filled with magnetically hard particles**A. V. Bakhtiarov^{1, *}, G. V. Stepanov¹, D. A. Lobanov¹, D. A. Semerenko², P. A. Storozhenko¹**¹*Russian State Scientific Institute for Chemical Technologies of Organoelement Compounds, Moscow, 105118 Russia*²*Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005 Russia***e-mail: abakhtia@gmail.com*

Silicone-based elastomer containing Nd-Fe-B-alloy particles garnished with a small portion of nickel grains has been studied for the capability to conduct alternating current. The observations suggest that the presence of nickel expands the variation range of the conductivity and magnetocapacitance in external magnetic fields. In addition, the composite demonstrates the memory of primary magnetizing manifesting itself as certain specific features of the hysteresis loops depending on the polarity of the external magnetic field.

Keywords: magnetoactive elastomer, composite, magnetorheological elastomer, magnetically hard filling material, nickel, silicone polymer, conductivity, resistivity, capacitance, hysteresis.