

Метод измерения деформаций магнитоактивных эластомеров под действием магнитных полей

Д.В. Савельев¹,
Л.Ю. Фетисов^{1,@},
Д.В. Чашин¹,
П.А. Шабин¹,
Д.А. Вьюник¹,
Ф.А. Федулов¹,
W. Kettl²,
M. Shamonin²

¹МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

²Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg, 93049 Regensburg, Germany

@Автор для переписки, e-mail: fetisovl@yandex.ru

Магнитодеформация представляет собой изменение размеров и формы образца под действием однородного внешнего магнитного поля. Исследование данного эффекта в различных материалах позволяет изучить природу магнитных и механических взаимодействий в них. Большой интерес вызывает магнитодеформация и с инженерной точки зрения для конструирования новых приборов и устройств микросистемной техники. В магнитоактивных эластомерах, содержащих магнитные микрочастицы в полимерной матрице, обнаружена гигантская деформация под действием внешнего магнитного поля. Общеизвестные методы измерения магнитодеформации в магнитоактивных мягких материалах в настоящее время практически отсутствуют. В статье описана установка, разработанная для исследования магнитомеханических характеристик магнитоактивных эластомеров, и продемонстрированы ее экспериментальные возможности. Установка позволяет измерить деформации в диапазоне от 0 до 12.5 мм с разрешением 1 мкм. Получаемые при помощи данной установки деформационные кривые необходимы для разработки актюаторных и сенсорных устройств на основе магнитоактивных эластомеров и улучшения технологий их изготовления.

Ключевые слова: магнитоактивные эластомеры, магнитострикция, магнитодеформации, ферромагнетики, микрочастицы.

Method of Measuring Deformations of Magnetoactive Elastomers under the Action of Magnetic Fields

Dmitry V. Saveliev¹,
Leonid Yu. Fetisov^{1,@},
Dmitry V. Chashin¹,
Pavel A. Shabin¹,
Darya A. Vyunik¹,
Fedor A. Fedulov¹,
Wolfgang Kettl²,
Mikhail Shamonin²

¹MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia

²Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg, 93049 Regensburg, Germany

@Corresponding author e-mail: fetisovl@yandex.ru

Magnetic deformation is a change in the size and shape of a sample under the action of a uniform external magnetic field. The study of this effect in various materials provides deep understanding of the nature of magnetic and mechanical interactions. Moreover, magnetic deformation is of great interest from an engineering point of view for designing new devices. In magnetoactive elastomers containing magnetic microparticles in the polymer matrix, a giant deformation is detected under the action of an external magnetic field. The generally accepted methods for measuring magnetic deformation in magnetoactive soft materials are now practically absent. The article describes the installation for the study of the magnetomechanical characteristics of magnetoactive elastomers and demonstrates its experimental capabilities. The installation allows to measure deformations in the range from 0 to 12.5 mm with a resolution of 1 micron. The deformation curves obtained using these installations are required for developing actuators and sensors based on magnetoactive elastomers, and also for improving their manufacturing technologies.

Keywords: magnetoactive elastomers, magnetostriction, magnetodeformation, ferromagnetics, microparticles.

Введение

Исследование процессов деформации магнитных материалов под действием внешних магнитных полей представляет значительный интерес как с физической, так и с прикладной точек зрения. Изучение подобных явлений позволяет лучше понять физику взаимодействий в различных магнитных материалах. Кроме того, магнитодеформация находит широкое применение в различных областях науки и техники при конструировании новых приборов и устройств, таких как микроактюаторы в микросистемной технике, генераторы ультразвука в дефектоскопии и подводной локации, приборы для бесконтактного измерения расстояний и т. д. [1]. Магнитодеформацию обычно характеризуют безразмерной величиной – относительным изменением линейных размеров образца $\lambda = \Delta l / l$, где Δl – удлинение (или укорочение) образца под действием магнитного поля H , а l – длина образца.

В магнитных металлах и сплавах деформация вызывается эффектом магнитострикции, который заключается в изменении размеров или формы образца при изменении его намагниченности под действием внешнего поля [2]. В большинстве магнитных материалов (например, никель, железо, кобальт и их сплавы) величина магнитострикции обычно составляет порядка $\lambda \sim 10^{-7}$ – 10^{-5} . В некоторых сплавах на основе редкоземельных металлов деформации увеличиваются до значений $\lambda \sim 10^{-3}$. В частности, наибольшая магнитострикция $\lambda \sim 2 \cdot 10^{-3}$ обнаружена в материале Terfenol-D [3].

В последние десятилетия активно развиваются исследования магнитоактивных эластомеров (МАЭ), которые представляют собой полимерную матрицу с помещенными в нее магнитными микрочастицами [4]. Магнитные эластомеры обладают целым набором уникальных свойств, одним из которых является гигантская деформация во внешнем магнитном поле, величина которой может достигать десятков процентов. В МАЭ частицы наполнителя сами не обладают магнитострикцией, а деформация образцов возникает из-за изменения их взаимного расположения под действием внешнего магнитного поля.

В настоящее время используют несколько основных методов измерения деформаций образцов под действием внешнего магнитного поля: тензометрический [5], оптический (интерференционный) [6] и емкостной [7].

Использование того или иного метода измерения деформаций зависит как от типа вещества и его характеристик, так и от формы и размеров образцов. Чаще всего измерения проводят на образцах в виде пластин либо цилиндров. Существующие методы измерения хорошо работают для малых величин магнитодеформации $\lambda \sim 10^{-6}$ – 10^{-3} , но не позволяют измерять деформации величиной в десятки процентов, которые наблюдаются в МАЭ. Кроме того, классические магнитострикционные материалы, как правило, достаточно жесткие (модуль Юнга составляет 10^{11} Па), в то время как МАЭ могут быть намного мягче (модуль Юнга порядка 100 кПа и менее). Общеизвестные методы измерения больших деформаций таких мягких материалов в настоящее время практически отсутствуют.

В данной статье приводится описание установки для измерения деформационных зависимостей магнитоактивных эластомеров от магнитного поля. Установка была разработана в научно-образовательном центре «Магнитоэлектрические материалы и устройства» МИРЭА – Российского технологического университета (РТУ МИРЭА).

Экспериментальная часть

Исследуемые образцы МАЭ представляли собой матрицу из полидиметилсилоксана, которая наполнена порошком из карбонильного железа (тип SQ, BASF SE Carbonyl Iron Powder & Metal Systems, Ludwigshafen, Germany). Средний диаметр d_{50} магнитных частиц составлял 3.9–5.0 мкм. Технология изготовления МАЭ подробно описана в работе [8]. Для проведения исследований были изготовлены несколько партий образцов различных геометрических размеров и состава. Образцы имели цилиндрическую форму одинакового диаметра и разной высоты. Фотография одного из образцов приведена на рис. 1. Магнитное поле прикладывали вдоль оси цилиндра и измеряли продольную магнитодеформацию. Блок-схема установки приведена на рис. 2.

Установка состоит из коромысла (2), выполненного из алюминиевой балки толщиной 10 мм, закрепленной на вращающейся оси, установленного в блок приборных подшип-

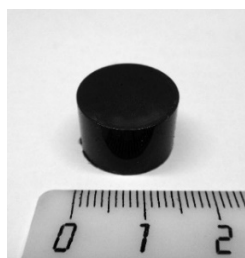


Рис. 1. Фотография образца.

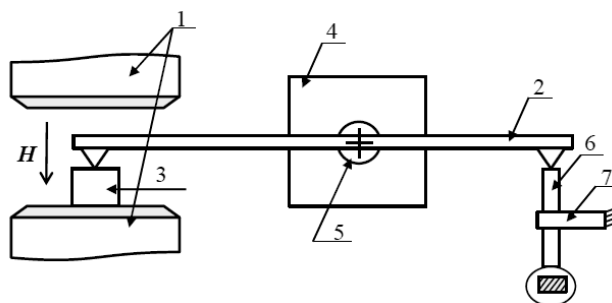


Рис. 2. Блок-схема установки для измерения зависимости магнитострикции МАЭ от магнитного поля H : 1 – полюса электромагнита; 2 – кронштейн; 3 – образец магнитоактивного эластомера; 4 – двухкоординатный стол; 5 – блок подшипников; 6 – электронный микрометр ИЦ 0-12.5; 7 – штатив.

ников (5), обеспечивающих свободное горизонтальное вращение коромысла. На краях коромысла установлены штифты из бронзы, один из них упирается в образец эластомера, а другой – в микрометр линейного перемещения. Аналогичная геометрия измерения магнитострикционных деформаций металлов была предложена в работе [9]. Образец эластомера (3) крепится на одном из полюсов электромагнита. На свободный конец образца крепится стеклянная пластинка, в которую упирается коромысло – тем самым удастся избежать локальной деформации эластомера. При отсутствии магнитного поля система находится в равновесии. После того, как электромагнит (1) создает однородное магнитное поле, МАЭ начинает деформироваться по направлению поля. В результате этого коромысло отклоняется. Степень отклонения определяется при помощи электронного микрометра (6) марки ИЦ 0-12.5, работающего с разрешением 0.001 мм в диапазоне 0–12.5 мм. Блок приборных подшипников устанавливается на двухкоординатном столе (4), что позволяет корректировать установку коромысла относительно образца. Время измерения одной точки составляло 1.5 мин. Внешний вид установки приведен на рис. 3.

Таким образом, разработанная установка для измерения зависимостей деформации образцов от величины магнитного поля имеет следующие характеристики: она позволяет создавать магнитные поля в диапазоне от 0 до 10 кЭ и измерять деформации в диапазоне от 0 до 12.5 мм с разрешением 1.0 мкм.

Результаты и их обсуждение

Особенностью измерения деформаций в магнитоактивных эластомерах является то, что под действием магнитного поля меняются не только свойства самих магнитных микрочастиц в матрице, но также происходит изменение положения частиц в матрице, что оказывает сильное влияние на свойства образцов (магнитные, диэлектрические, механи-



Рис. 3. Внешний вид установки для измерения зависимости магнитострикции МАЭ от магнитного поля H .

ческие). В то же время магнитострикция самих частиц мала и никак не влияет на деформации МАЭ [10]. Экспериментальные кривые, полученные при помощи разработанной установки и описанные далее, дают возможность получить информацию о процессах реструктуризации, происходящих в МАЭ, и необходимы для проектирования устройств на их основе.

Прежде всего, разработанная установка дает возможность измерять зависимости относительного удлинения $\lambda = \Delta l_0 / l$ при приложении к образцу постоянного магнитного поля, направленного вдоль оси цилиндра, где l_0 – начальная высота цилиндра. В качестве примера на рис. 4 приведены полевые зависимости деформаций, измеренных для двух образцов с различными массовыми долями карбонильного железа (1 – 75%; 2 – 80%). Диаметры образцов составляли 13.6 и 14.7 мм, а высоты – 9.6 и 9.4 мм, соответственно. Как видно из приведенных зависимостей, магнитоактивные эластомеры характеризуются сильным гистерезисом (стрелками на рисунке показано направление изменения поля). Причем большая максимальная деформация наблюдается для образца с меньшей концентрацией (массовой долей) частиц. Уменьшение деформации начинается примерно при одном и том же значении магнитного поля (3200 Э). Особое внимание следует обратить на наличие заметной остаточной деформации порядка 0.01 у всех образцов.

Кроме того, отличительной особенностью деформации магнитоактивных эластомеров, в отличие от аналогичных зависимостей для магнитострикционных металлов и сплавов (Ni, FeGa, FeNi, Terfenol, Metglas), является наличие начального поля, ниже которого образец не деформируется. Величина данного поля зависит от концентрации частиц и растет с 400 Э для 75% до 1300 Э для 80%. На начальном участке зависимости обе кривые аппроксимируются параболой до поля $H \approx 3$ кЭ.

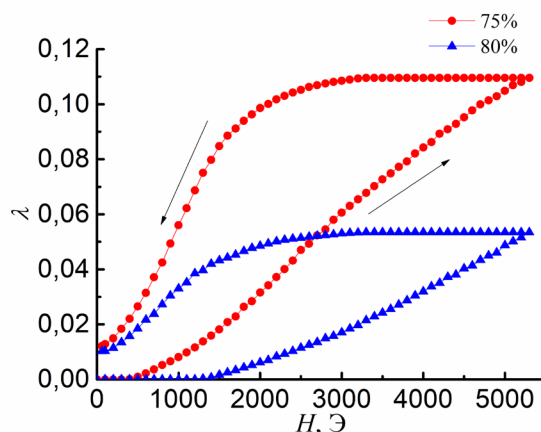


Рис. 4. Зависимости относительного удлинения образцов λ от постоянного магнитного поля H для двух образцов с разными концентрациями магнитных частиц.

Основные характеристики образцов, полученные из измеренных зависимостей, приведены в таблице. H_0 – поле, в котором образец начинает деформироваться; λ_{max} – максимальное значение магнитострикции; H_r – поле, в котором образец начинает уменьшаться; λ_r – остаточная магнитострикция. Как видно, МАЭ с массовой долей карбонильного железа 75% обладает наибольшей величиной как максимальной ($\lambda_{max} = 0.11$), так и остаточной ($\lambda_r = 0.012$) магнитострикции.

Основные характеристики образцов

Массовая доля железа, %	75	80
H_0 , Э	400	1300
λ_{max}	0.11	0.053
H_r , Э	3200	3200
λ_r	0.012	0.010

Характеристики магнитоактивных эластомеров зависят не только от концентрации магнитных частиц, но и от механических свойств матрицы, в частности, модуля сдвига. Потому далее приведем пример измеренных зависимостей деформации от магнитного поля для двух образцов с одинаковой массовой долей железа (75%) и двумя модулями сдвига: ≈ 30 и ≈ 40 кПа при отсутствии магнитного поля (рис. 5).

Полученные эластомеры обладают вязкоупругими свойствами, их модуль сдвига G измерялся на низкой угловой частоте (10 рад/с) при малой сдвиговой деформации (0.01%) в геометрии пластина/пластина на коммерчески доступном реометре с магнитореологической ячейкой. Так как результирующий эластомерный композит является практически несжимаемым, соответствующий модуль Юнга Y может быть оценен по формуле: $Y \approx 3G$. Управление модулем эластичности композитных материалов достигалось вариацией массовых долей сшивающего агента и пластификатора в полимерной матрице [11]. Экспериментальные образцы имели форму цилиндра диаметром 14.9 и 13.5 мм и высотой 9.4 и 8.2 мм, соответственно.

Как видно из рис. 5, форма кривых практически не меняется в зависимости от величины модуля сдвига образца. Однако, во-первых, изменяется начальное поле деформации.

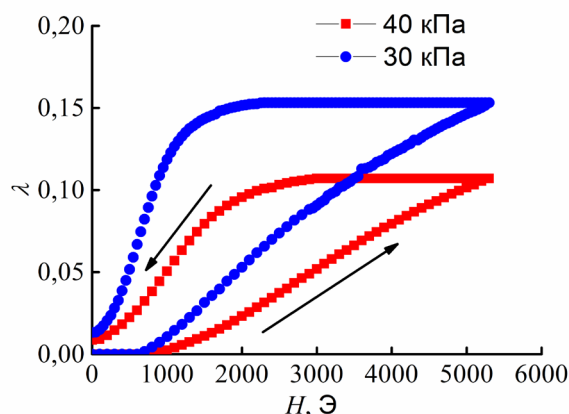


Рис. 5. Зависимости деформации λ от постоянного магнитного поля H для двух образцов с одинаковой концентрацией карбонильного железа (75%) и различными модулями сдвига: а) 30 кПа; б) 40 кПа.

ции с 700 Э для мягкого образца (30 кПа) до 900 Э для более жесткого образца (40 кПа). Во-вторых, как и следует ожидать, деформация более мягкого образца значительно больше. Значение для образца с модулем сдвига 30 кПа $\lambda_{max} = 0.153$ практически в 1.5 раза больше, чем соответствующее значение $\lambda_{max} = 0.107$ для образца с модулем сдвига 40 кПа. Также сильно меняется величина поля, с которого начинается уменьшение деформации. Оно уменьшается с 2900 Э для образца с модулем сдвига 40 кПа до 2250 Э для образца с модулем сдвига 30 кПа. Остаточная деформация меняется незначительно.

Таким образом, из приведенных результатов измерений видно, что характеристики полимерной матрицы оказывают сильное влияние на деформационные зависимости магнитоактивных эластомеров. Так как во всех исследованных образцах использовали одинаковые частицы, то их влияние на свойства МАЭ не рассматривалось. Исследование свойств микрочастиц и их влияние на различные характеристики МАЭ приведено в работе [12]. Данные измерений могут быть использованы для оптимизации технологического процесса производства МАЭ с целью получения оптимальных магнитных и механических характеристик.

Кроме того, установка позволяет изменять магнитное поле как в положительном направлении (от 0 до 10 кЭ), так и в отрицательном (от 0 до -10 кЭ). Таким образом, можно получить вид деформационной зависимости во всем диапазоне полей. Пример такой зависимости для исследованного ранее образца с модулем сдвига 30 кПа диаметром 14.9 мм и высотой 9.4 мм показан на рис. 6. Как видно, для исследованных образцов зависимость имеет симметричный вид относительно нулевого поля. Стрелками на рис. 6 показано направление изменения магнитного поля. Измерения начинали при полностью размагниченном состоянии образца.

В работе также проведено измерение зависимости магнитодеформаций образцов от их длины. На рис. 7 приведена подобная зависимость для цилиндрических образцов с модулем сдвига около 30 кПа. Образцы отличались длиной: 1 – 3.8 мм, 2 – 8.2 мм, 3 – 13.8 мм. Диаметры образцов составляли: 1 – 14.8 мм, 2 – 13.5 мм, 3 – 14.7 мм. Как видно из рисунка, увеличение длины образца приводит к увеличению максимальной магнитострикции λ_{max} от 0.08 до 0.19, что можно объяснить уменьшением размагничивающего

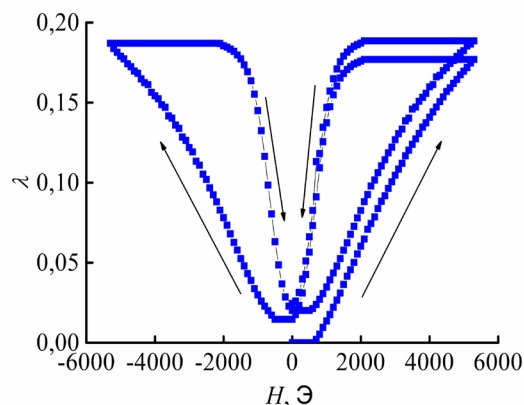


Рис. 6. Симметричная зависимость деформации образца с модулем сдвига около 30 кПа и концентрацией магнитных частиц 75% от магнитного поля.

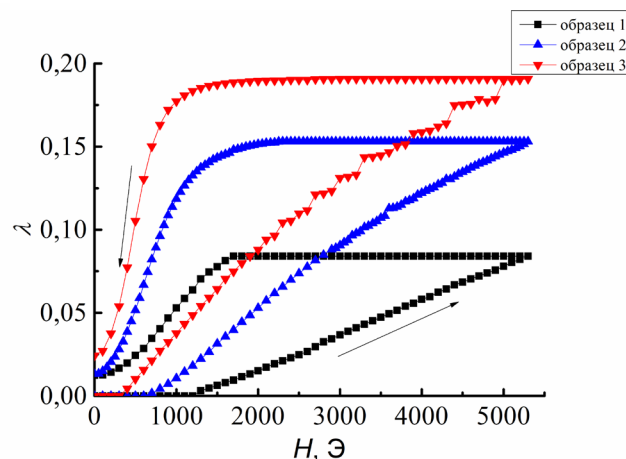


Рис. 7. Зависимость деформации образцов 1–3 от магнитного поля.

поля с увеличением отношения длины образца к его диаметру. Остаточные деформации также увеличиваются от 0.012 до 0.24. Кроме того, размеры образца оказывают сильное влияние на величину магнитных полей, в которых начинаются деформации образца. Чем больше отношение длины образца к его диаметру, тем меньше внешнее критическое поле H_0 , при котором наблюдается заметная деформация. По-видимому, при этом критическом поле магнитные силы, действующие на частицы ферромагнитного наполнителя, начинают превышать упругие силы со стороны деформируемой эластичной матрицы.

Для объяснения процессов, происходящих в образцах МАЭ под действием магнитного поля, интерес могут представлять исследования частных петель деформационного гистерезиса. Пример таких измерений приведен на рис. 8. Измерения проводили для исследованного ранее образца с модулем сдвига 40 кПа, диаметром 14.9 мм и высотой 9.4 мм в трех диапазонах полей: от 0 до 1500 Э; от 0 до 3 кЭ; от 0 до 4.5 кЭ. Недостатком таких измерений можно считать то, что при большой высоте образца происходит неравномерная деформация, которая может повлиять на форму частных петель деформационного гистерезиса. В свою очередь, такие измерения могут иметь решающее значение для практических применений, так как на практике часто приходится иметь дело с неоднородными магнитными полями и необходимо знать, как они влияют на характер деформаций.

В процессе проведения измерений была обнаружена сильная зависимость свойств МАЭ от длительности измерений и, возможно, от его температуры. В результате продолжительных измерений в больших полях полюса электромагнита они нагреваются, что может привести к возникновению погрешностей измерения, связанных с нагревом. Известно, что процессы реструктуризации наполнителя в МАЭ, вызванные внешним магнитным полем, могут протекать на временных масштабах до порядка 1000 с [10, 13]. С другой стороны, известно, что реологические свойства МАЭ слабо зависят от температуры [14]. При нагреве от 23 до 35 °С в поле 1 кЭ происходит увеличение (дрейф) деформации образца примерно на 30%. Время нагрева составляет приблизительно 40 мин. Этот вклад в деформационные кривые необходимо учитывать как при измерениях

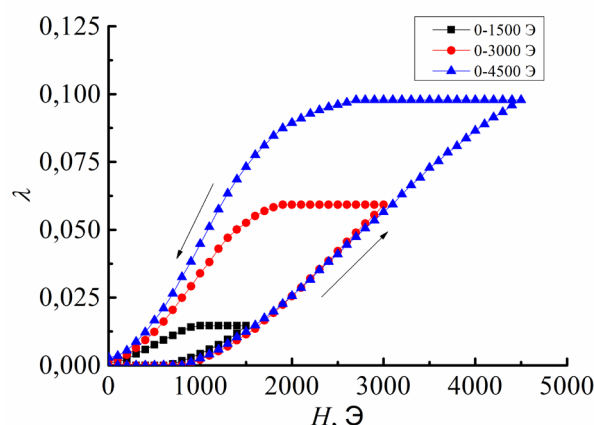


Рис. 8. Измеренные частные петли деформационного гистерезиса для образца с содержанием магнитных частиц 75% и модулем сдвига около 40 кПа.

деформаций от магнитных полей, так и при температурных измерениях. Дрейф магнитострикции в сторону ее увеличения для последовательных петель магнитострикционного гистерезиса виден также на рис. 6.

Заключение

Таким образом, в статье описана разработанная установка для исследования магнитомеханических характеристик магнитоактивных эластомеров и продемонстрированы ее экспериментальные возможности. Установка позволяет измерять деформации в диапазоне от 0 до 12.5 мм с разрешением 1.0 мкм. Получаемые при помощи установки деформационные кривые являются важными для исследования магнитомеханических взаимодействий в магнитоактивных эластомерах, разработки актюаторных и сенсорных устройств на их основе и улучшения технологий их изготовления. Дальнейшее совершенствование описанной методики лежит в области повышения чувствительности установки, исследования воздействия температуры на характеристики МАЭ и в повышении технологичности самой установки.

Благодарности

Работа выполнена в рамках совместного проекта Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-502-12037) и Немецкого исследовательского общества (Deutsche Forschungsgemeinschaft, грант 389008375).

Литература:

1. Белов К.П. Магнитострикционные явления и их технические приложения. М.: Наука, 1987. 158 с.
2. Физическая энциклопедия : в 5-ти т. / Гл. ред. А.М. Прохоров. М.: Советская энциклопедия (тт. 1-2); Большая Российская энциклопедия (тт. 3-5), 1988-1999.
3. Engdahl G. Handbook of Giant Magnetostrictive Material. San Diego: Academic, 2000. 386 p.
4. Elhajjar R., Law C.-T., Pegoretti A. Magnetostrictive polymer composites: Recent advances in materials, structures and properties // Progr. Mater. Sci. 2018. V. 97. P. 204–229. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2018.02.005>
5. Chashin D.V., Burdin D.A., Fetisov L.Yu., Economov N.A., Fetisov Yu.K. Precise measurements of magnetostriction of ferromagnetic plates // Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics. 2018. V. 11(1). P. 30–34. <https://doi.org/10.17516/1997-1397-2018-11-1-30-34>
6. Samanta H., Nagata Y., Uchida T., Abe S. New optical technique for bulk magnetostriction measurement // J. Magn. Magn. Mater. 2000. V. 212. № 3. P. 355–360. [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(99\)00832-X](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(99)00832-X)
7. Boley M.S., Shin W.C., Rigsbee D.K., Franklin D.A. Capacitance bridge measurements for magnetostriction // J. Appl. Phys. 2002. V. 91(10). P. 8210–8212. <https://doi.org/10.1063/1.1447512>

8. Belyaeva I.A., Kramarenko E.Y., Shamonin M. Magnetodielectric effect in magnetoactive elastomers: Transient response and hysteresis // *Polymer*. 2017. V. 127. P. 119–128. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2017.08.056>
9. Webster W.L. Magneto-striction in iron crystals // *Proceed. of the Royal Society A*. 1925. Iss. 109. P. 570–584. <https://doi.org/10.1098/rspa.1925.0146>
10. Shamonin M., Kramarenko E.Y. Highly responsive magnetoactive elastomers // *Novel Magnetic Nanostructures*. 2018. P. 221–245. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813594-5.00007-2>
11. Glavan G., Kettl W., Brunhube, A., Shamonin, M., Drevenšek-Olenik I. Effect of material composition on tunable surface roughness of magnetoactive elastomers // *Polymers*. 2019. V. 11(4) P. 594. <https://doi.org/10.3390/polym11040594>
12. 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 // *J. Phys.: Condens. Matter*. 2008. V. 20. P. 204121. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/20/20/204121>
13. Belyaeva I.A., Kramarenko E.Y., Stepanov G.V., Sorokin V.V., Stadler D., Shamonin M. Transient magnetorheological response of magnetoactive elastomers to step and pyramid excitations // *Soft Matter*. 2016. V. 12(11). P. 2901–2913. <https://doi.org/10.1039/C5SM02690C>
14. Sorokin V.V., Ecker E., Stepanov G.V., Shamonin M., Monkman G.J., Kramarenko E.Y., Khokhlov A.R. Experimental study of the magnetic field enhanced Payne effect in magnetorheological elastomers // *Soft Matter*. 2014. V. 10(43). P. 8765–8776. <https://doi.org/10.1039/C4SM01738B>

References:

1. Belov K.P. Magnetostriction phenomena and their technical applications. Moscow: Nauka Publ., 1987. 158 p., (in Russ.).
2. Physical Encyclopedia: in 5 volumes. Ed. A.M. Prokhorov. Moscow: Sovetskaya entsiklopediya (V. 1-2); Bol'shaya Rossiyskaya entsiklopediya (v. 3-5), 1988-1999, (in Russ.).
3. Engdahl G. Handbook of Giant Magnetostrictive Material. San Diego: Academic, 2000. 386 p.
4. Elhajjar R., Law C.-T., Pegoretti A. Magnetostrictive polymer composites: Recent advances in materials, structures and properties. *Progr. Mater. Sci.* 2018; 97:204-229. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2018.02.005>
5. Chashin D.V., Burdin D.A., Fetisov L.Yu., Economov N.A., Fetisov Y.K. Precise measurements of magnetostriction of ferromagnetic plates. *Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics*. 2018; 11(1):30-34. <https://doi.org/10.17516/1997-1397-2018-11-1-30-34>
6. Samanta H., Nagata Y., Uchida T., Abe S. New optical technique for bulk magnetostriction measurement. *J. Magn. Magn. Mater.* 2000; 212(3):355-360. [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(99\)00832-X](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(99)00832-X)
7. Boley M. S., Shin W.C., Rigsbee D.K., Franklin D.A. Capacitance bridge measurements for magnetostriction. *J. Appl. Phys.* 2002; 91(10):8210-8212. <https://doi.org/10.1063/1.1447512>
8. Belyaeva I.A., Kramarenko E.Y., Shamonin M. Magnetodielectric effect in magnetoactive elastomers: Transient response and hysteresis. *Polymer*. 2017; 127:119-128. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2017.08.056>
9. Webster W.L. Magneto-striction in iron crystals. *Proceed. of the Royal Society A*. 1925; 109:570-584. <https://doi.org/10.1098/rspa.1925.0146>
10. Shamonin M., Kramarenko E.Y. Highly responsive magnetoactive elastomers. *Novel Magnetic Nanostructures*. 2018:221-245. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813594-5.00007-2>
11. Glavan G., Kettl W., Brunhuber A., Shamonin M., Drevenšek-Olenik I. Effect of material composition on tunable surface roughness of magnetoactive elastomers. *Polymers*. 2019; 11(4):594. <https://doi.org/10.3390/polym11040594>
12. 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. *J. Phys.: Condens. Matter*. 2008; 20:204121. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/20/20/204121>
13. Belyaeva I.A., Kramarenko E.Y., Stepanov G.V., Sorokin V.V., Stadler D., Shamonin M. Transient magnetorheological response of magnetoactive elastomers to step and pyramid excitations. *Soft Matter*. 2016; 12(11):2901-2913. <https://doi.org/10.1039/C5SM02690C>
14. Sorokin V.V., Ecker E., Stepanov G.V., Shamonin M., Monkman G.J., Kramarenko E.Y., Khokhlov A.R. Experimental study of the magnetic field enhanced Payne effect in magnetorheological elastomers. *Soft Matter*. 2014; 10(43):8765-8776. <https://doi.org/10.1039/C4SM01738B>

Об авторах:

Савельев Дмитрий Владимирович, аспирант кафедры наноэлектроники Физико-технологического института ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). ResearcherID D-8952-2019, Scopus Author ID 57196479660, <https://orcid.org/0000-0001-7762-9198>

Фетисов Леонид Юрьевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры нанoeлектроники Физико-технологического института ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). ResearcherID D-1163-2013, Scopus Author ID 26431336600, <https://orcid.org/0000-0002-3699-4321>

Чашин Дмитрий Владимирович, кандидат технических наук, ведущий инженер Научно-образовательного центра «Магнитоэлектрические материалы и устройства» ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). ResearcherID D-9629-2019, Scopus Author ID 23977510200

Шабин Павел Александрович, студент кафедры нанoeлектроники Физико-технологического института ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Вьюник Дарья Андреевна, студент кафедры нанoeлектроники Физико-технологического института ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Федулов Федор Алексеевич, аспирант кафедры нанoeлектроники Физико-технологического института ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). Scopus Author ID 57194284263

Wolfgang Kettl, студент магистратуры «Электротехника и микросистемная техника», Университет прикладных наук г. Регенсбург (58, Prüfeninger str., Regensburg 93049, Германия).

Mikhail Shamonin, Dr. Rer. Nat., профессор, факультет «Электротехника и информационные технологии», Университет прикладных наук г. Регенсбург (58, Prüfeninger str., Regensburg 93049, Германия). Scopus Author ID 7003493217, <https://orcid.org/0000-0001-5637-7526>. E-mail: mikhail.chamonine@oth-regensburg.de

About the authors:

Dmitry V. Saveliev, Postgraduate Student of the Chair of Nanoelectronics, Institute of Physics and Technology, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). ResearcherID D-8952-2019, Scopus Author ID 57196479660, <https://orcid.org/0000-0001-7762-9198>

Leonid Yu. Fetisov, Cand. of Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor of the Chair of Nanoelectronics, Institute of Physics and Technology, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). ResearcherID D-1163-2013, Scopus Author ID 26431336600, <https://orcid.org/0000-0002-3699-4321>

Dmitry V. Chashin, Leading Engineer of the Research and Educational Center «Magnetoelectric materials and Devices», MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). ResearcherID D-9629-2019, Scopus Author ID 23977510200

Pavel A. Shabin, Student of the Chair of Nanoelectronics, Institute of Physics and Technology, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Darya A. Vyunik, Student of the Chair of Nanoelectronics, Institute of Physics and Technology, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Fedor A. Fedulov, Postgraduate Student of the Chair of Nanoelectronics, Institute of Physics and Technology, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). Scopus Author ID 57194284263

Wolfgang Kettl, Master Student «Electrical Engineering and Microsystem Technology», Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg (58, Prüfeninger Str., Regensburg 93049, Germany).

Mikhail Shamonin, Dr. Rer. Nat., Professor, Fakultät Elektro- und Informationstechnik, Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg (58, Prüfeninger Str., Regensburg 93049, Germany). Scopus Author ID 7003493217, <https://orcid.org/0000-0001-5637-7526>. E-mail: mikhail.chamonine@oth-regensburg.de

Для цитирования: Савельев Д.В., Фетисов Л.Ю., Чашин Д.В., Шабин П.А., Вьюник Д.А., Федулов Ф.А., Kettl W., Shamonin M. Метод измерения деформаций магнитоактивных эластомеров под действием магнитных полей // Российский технологический журнал. 2019. Т. 7. № 4. С. 81–91. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-4-81-91>

For citation: Saveliev D.V., Fetisov L.Yu., Chashin D.V., Shabin P.A., Vyunik D.A., Fedulov F.A., Kettl W., Shamonin M. Method of measuring deformations of magnetoactive elastomers under the action of magnetic fields. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal* = Russian Technological Journal. 2019; 7(4):81-91, (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-4-81-91>