

УДК 621.646.94 +537.621.4

**Г.В. Степанов<sup>1</sup>, Е.Ю. Крамаренко<sup>2</sup>, Н.С. Перов<sup>2</sup>,  
А.С. Семисалова, Д.Ю. Борин<sup>3</sup>, В.В. Богданов<sup>4</sup>, Д.А. Семеренко<sup>5</sup>,  
А.В. Бахтияров<sup>1</sup>, Л.Д. Свиридова<sup>1</sup>, П.А.Стороженко<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Государственный научно-исследовательский институт химии  
и технологии элементоорганических соединений, Москва, Россия  
<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова.  
Физический факультет. Москва, Россия

<sup>3</sup>Технический университет Дрездена, Дрезден, Германия

<sup>4</sup>Московский государственный машиностроительный университет,  
Москва, Россия

<sup>5</sup>Московский государственный технический университет  
им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

## **МАГНИТОАКТИВНЫЙ ПОЛИМЕР С МАГНИТОТВЕРДЫМ НАПОЛНИТЕЛЕМ**

Магнитоактивный эластомер – новый тип магнитоуправляемых материалов, свойства которых обратимо изменяются под действием магнитного поля. Данный материал относится к классу Smart materials.

Одним из свойств материала является магнитореологический эффект, т.е. зависимость вязкоупругих свойств от магнитного поля. На самом деле материал обладает большим набором разных свойств. Подробное исследование материала выявило в нем наличие совокупности свойств: магнитореологический эффект, магнитодеформационный эффект, магнитострикционный эффект, эффект памяти формы (эффект псевдопластичности), магниторезистивный эффект, магнитопьезорезистивный эффект. Такие параметры, как диэлектрическая проницаемость и магнитная восприимчивость, также изменяются под действием магнитного поля. Многообразные свойства материала определяются процессами диполь-дипольного взаимодействия между намагниченными частицами магнитного наполнителя, а также процессами обратимого перемещения (структурирования) или вращения анизотропных частиц наполнителя внутри полимерной матрицы. Области применения материала – эффективные пассивные и активные управляемые демпфирующие устройства, датчики магнитного поля, ускорения, давления, деформации, а также биологии – клеточных технологий.

**Ключевые слова:** магнитореологический, магнитоактивный эластомер, магнитный гель, ферроэласт, магнитореологический эффект, магнитодеформационный эффект, магнитострикционный эффект, эффект памяти формы, диэлектрическая проницаемость.

**G.V. Stepanov<sup>1</sup>, E.Y. Kramarenko<sup>2</sup>, N.S. Perov<sup>2</sup>, A.S. Semisalova<sup>2</sup>,  
D.Y. Borin<sup>3</sup>, V.V. Bogdanov<sup>4</sup>, D.A. Semerenko<sup>5</sup>, A.V. Bakhtiiarov<sup>1</sup>,  
L.V. Sviridova<sup>1</sup>, P.A. Storozhenko<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>State Scientific Research Institute of Chemistry and Technology  
of Organoelement Compounds, Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup>Physics Department, Lomonosov Moscow State University,  
Moscow, Russian Federation

<sup>3</sup>Technische Universität Dresden, Dresden, Germany

<sup>4</sup>Moscow State University of Mechanical Engineering,  
Moscow, Russian Federation

<sup>5</sup>Bauman Moscow State Technical University,  
Moscow, Russian Federation

## **MAGNETOACTIVE POLYMER CONTAINING HARD MAGNETIC FILLERS**

The magnetoactive elastomer features a novel type of magnetocontrollable materials exhibiting reversible changes in their properties under the influence of the magnetic field, for which they are classified as *Smart materials*.

One of the properties possessed by the material is the ability to exhibit the dependence of its viscoelasticity on the applied magnetic field, the phenomenon known as the magnetorheological effect. At the same time scrupulous studies have also resulted in the discovery of an extensive set of fascinating features including the magnetodeformational, magnetostrictional, shape memory (pseudoplasticity), magnetoresistive, and magnetopiezoresistive effects. Such parameters as dielectric permeability and magnetic susceptibility also change under the influence of the field. These properties are defined by dipole interaction among the magnetized particles of the magnetic filler and also by the processes of reversible displacement (structuring) and rotation of the anisotropic particles inside the polymer matrix.

The areas of application of such materials may include the creation and development of functional controllable active and passive damping devices, magnetic field, acceleration, pressure, and deformation sensors, and cell technologies in biological research.

**Keywords:** magnetorheological, magnetoactive elastomer, magnetic gel, ferroelastic material, magnetodeformational effect, magnetostrictional effect, shape memory effect, magnetoresistive effect, dielectric permittivity.

### **Введение**

Магнитоактивный эластомер (МАЭ) – новый тип магнитоуправляемых материалов, свойства которых обратимо изменяются под действием магнитного поля. Данный материал относится к классу *Smart materials*.

Одним из свойств материала, которое наиболее широко исследуется, является магнитореологический эффект, т.е. зависимость вязко-

упругих свойств от магнитного поля. Поэтому данный материал часто называют «магнитореологическим эластомером». На самом деле материал обладает большим набором разных свойств. В основе материала лежит эластичная полимерная матрица и магнитный наполнитель. В зависимости от истории получения материала различные исследователи называют материал по-разному: магнитореологический эластомер [1–18], магнитный гель [19–25], магнитоэластик [26–29], феррогель [30–31], магнитоактивный, магнитоуправляемый эластомер [32–34]. Подробное исследование материала выявило в нем наличие совокупности свойств: магнитореологический эффект, магнитодеформационный эффект, магнитострикционный эффект, эффект памяти формы (эффект псевдопластичности), магниторезистивный эффект, магнитопьезорезистивный эффект – сверхаддитивное изменение электропроводности под действием магнитного поля и механического давления. Такие параметры, как диэлектрическая проницаемость и магнитная восприимчивость, также могут изменяться под действием магнитного поля.

Первым широко исследуемым свойством является магнитореологический эффект. Материал запатентован и исследован американскими фирмами «Форд» и «Лорд Корпорейшен» [1–4]. Вторым интересным свойством является магнитодеформационный эффект (деформация в неоднородном магнитном поле) [15, 19, 21, 26–29] и магнитострикционный эффект (деформация в однородном магнитном поле) [35]. Данные свойства материала находят применение в конструкциях активных и пассивных демпфирующих устройств [1–6, 13], актуаторов, микродвижителей [35]. Интересным эффектом является эффект памяти формы, который проявляется, если поместить материал в однородное магнитное поле [29, 32]. Если материал поместить в однородное магнитное поле, то упругая резина становится пластичной, как пластилин (глина). Под действием внешней механической силы он приобретает новую форму. После выключения магнитного поля он восстанавливает первоначальную форму. В наших последних работах по синтезу и исследованию магнитореологических свойств МСЕ показано, что в области малых деформаций упругость и вязкость материала в магнитном поле 300 мТ может увеличиваться в 100 и 400 раз [35–37].

Таким образом, материал интересен как с точки практического применения, так и с точки зрения научных исследований характера взаимодействия магнитных частиц внутри полимерной матрицы.

Наши исследования посвящены получению МАЭ на основе порошков магнитных наполнителей – магнитомягкого железа и магнито- жесткого – железо-неодим-бор в силоксановой полимерной матрице.

### 1. Основные технологические стадии получения МАЭ

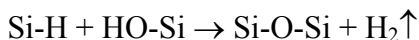
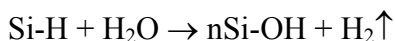
1. Модифицирование магнитного наполнителя. 2. Стадия грубого смешения магнитного наполнителя и жидкого силиконового каучука. 3. Тонкое диспергирование на валковом диспергаторе. 4. Смешение дисперсии с катализатором полимеризации в турбосмесителе. 5. Вакуумирование композиции. 6. Обработка формы антиадгезионным составом и заливка композиции в формы. 7. Магнитное структурирование. 8. Полимеризация композиции в термошкафу (СВЧ-нагрев).

*Особенности технологических стадий.* Важной технологической стадией является подготовка поверхности магнитного наполнителя. Известно, что чем мельче порошок, тем труднее его равномерно распределить в полимерной матрице. Мелкие порошки сильно агломерируются и, как правило, обладают гидрофильными свойствами. При смешении порошков с жидким силиконовым каучуком каучук не проникает между частицами в агломерате, а обволакивает агломерат из множества частиц. Даже использование диспергирующих устройств, таких как валковый диспергатор и ультразвук, не позволяет полностью разрушить агрегаты. Агрегаты уменьшаются в размерах, но все равно остаются.

Для снижения агрегации порошков и придания им гидрофобных свойств, для совместимости с жидким силиконовым каучуком порошок модифицируют. Порошок обрабатывают смесью гидрофобизатора ГКЖ-94  $(\text{CH}_3)_3\text{Si-O-}[\text{CH}_2\text{Si}(\text{H})\text{-O-}]_n\text{-Si}(\text{CH}_3)_3$  с силиконовым маслом (ПМС) в растворе гексана. Для порошков железа (2–5 мкм) концентрация модификатора составляет 1 % на массу порошка. Смесью порошка железа с раствором модификатора пропускают через валковый диспергатор и сушат.

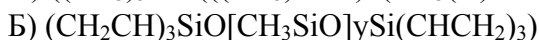
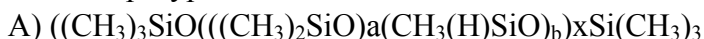
Второй причиной, по которой необходимо проводить модификацию и гидрофобизацию поверхности магнитного наполнителя, являются особенности полимеризации каучука. Если на поверхности наполнителя находятся ионы  $\text{OH}^-$ , то возможны побочные реакции при полимеризации каучука. При этом возникают значительные дефекты внутри образцов.

Процесс полимеризации силиконового полимера и побочные процессы, протекающие на поверхности магнитного наполнителя, определяются последовательностью реакций:

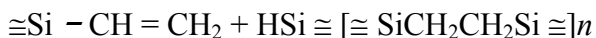


Таким образом, каждая частица оказывается отделена друг от друга и покрыта двойным слоем силиконовых молекул. Далее, такой модифицированный порошок легко распределяется в жидком силиконовом каучуке.

Полимерная матрица изготавливается из силиконового 2-компонентного каучука марки СИЭЛ производства ГНИИХТЭОС. Два компонента матрицы – низкомолекулярный винилсодержащий компонент (А) и гидридсодержащий компонент (Б) смешивают между собой, смешивают с магнитным наполнителем и полимеризуют при повышенной температуре.



В присутствии комплексного платинового катализатора –  $((\text{CH}_2 = \text{CH})_3\text{SiO}[\text{CH}_3\text{SiO}]_y - \text{Si}(\text{CH} = \text{CH}_2)_3 + \text{Pt} - \text{catalyst})$  протекает реакция



*Изготовление образца МУЭ заданной формы.* Технология получения изделия из МУЭ предполагает заливку жидкой смеси в форму с последующей полимеризацией при температуре 100–150 °С. В ходе нагрева возможно расслоение системы, особенно если в составе крупные частицы свыше 10 мкм. Чтобы предотвратить расслоение композиции, в состав вводят структурирующие добавки, увеличивающие вязкость системы, такие как аэросил и наномagnetит. Можно увеличить скорость полимеризации за счет увеличения скорости нагрева. Для этого на первой фазе нагрева использовали электромагнитное излучение диапазона СВЧ с частотой 2,4 ГГц и заданной мощности. На рис. 1 показан характер изменения температуры образца массой 100 г при конвекционном и СВЧ-нагреве.

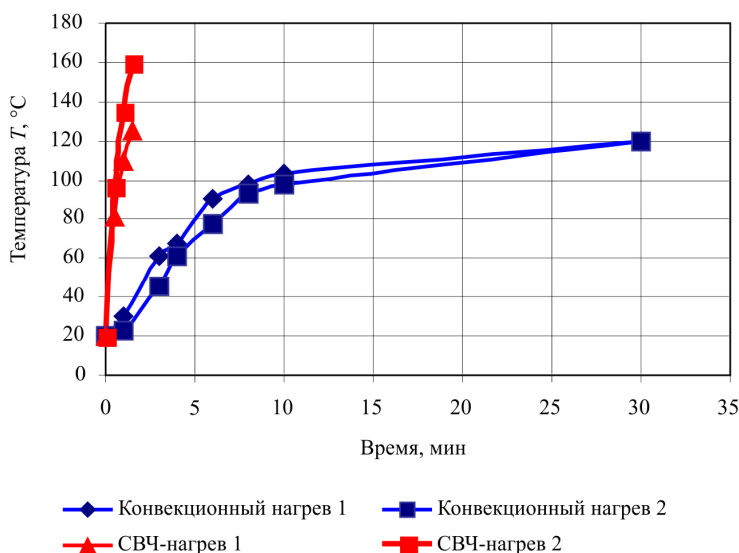


Рис. 1. Характер изменения температуры внутри цилиндрического образца размером 30×30 мм при конвекционном и СВЧ-нагреве

Как видно из графика, достижения заданной температуры внутри образца при СВЧ-нагреве в 20 раз больше, чем при конвекционном нагреве. При увеличении размеров образца время достижения заданной температуры внутри образца при конвекционном нагреве значительно возрастает.

Следует отметить, что при получении анизотропных образцов (полимеризованных в магнитном поле) проблемы расслоения не существует. Под действием магнитного поля магнитные частицы структурируются в цепи, и седиментация не происходит, поскольку силы магнитного взаимодействия между частицами значительно больше сил гравитации. В наших опытах мы получали структурированные образцы, помещая форму с жидкой композицией между магнитами из феррита бария с полем 300 Э. Следует отметить, что при этом можно применять СВЧ-нагрев, поскольку СВЧ-излучение не взаимодействует с ферритом бария. Другие магниты (металлические) не подходят для такой технологии.

## 2. Вязкоупругие свойства МАЭ с магнито жестким наполнителем

В рамках данного исследования изучались реологические свойства МАЭ с магнито жестким наполнителем – FeNdB. Данный наполнитель в отличие от ранее изучаемых образцов с карбонильным железом

обладает высокой остаточной намагниченностью после помещения его в магнитное поле. Образцы МАЭ были изготовлены в виде цилиндров диаметром 25 мм и высотой 2–3 мм с содержанием полидисперсной фракции магнитного наполнителя (2–70 мкм) в количестве 30 об.%. Измерения вязкоупругих свойств проводили на реометре Anton Paar Physica MCR301. Исследования проводили методом сдвига в режиме осцилляции при различной частоте и амплитуде. Далее образцы подвергали воздействию магнитного поля, после чего исследование вязкоупругих свойств повторяли. Целью эксперимента было сравнение вязкоупругих свойств до и после намагничивания в различных магнитных полях. Результаты представляют собой зависимость составляющих модуля  $G$  ( $G'$  – упругая составляющая,  $G''$  – вязкая составляющая, коэффициент потерь – отношение составляющих  $G''/G'$ ) от частоты при различных значениях амплитуды деформации образца после намагничивания в магнитных полях различной силы. Намагничивание образцов проводили в магнитных полях с интенсивностью 500, 743, 868, 1020, 1250 и 2000 мТл.

Была рассмотрена зависимость параметров  $G'$ ,  $G''$  и коэффициента потерь от частоты деформации для образца, не подвергавшегося воздействию магнитного поля (рис. 2–4).

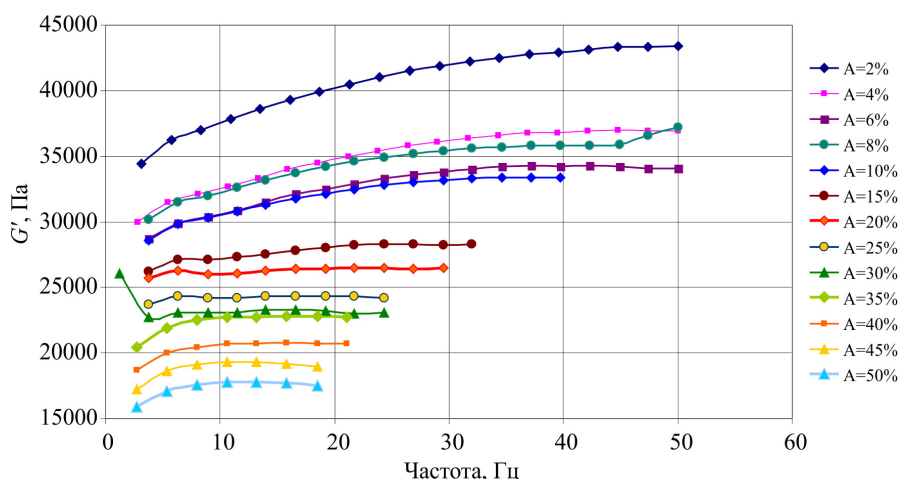


Рис. 2. Зависимость параметра  $G'$  от частоты деформации при различных значениях амплитуды деформации

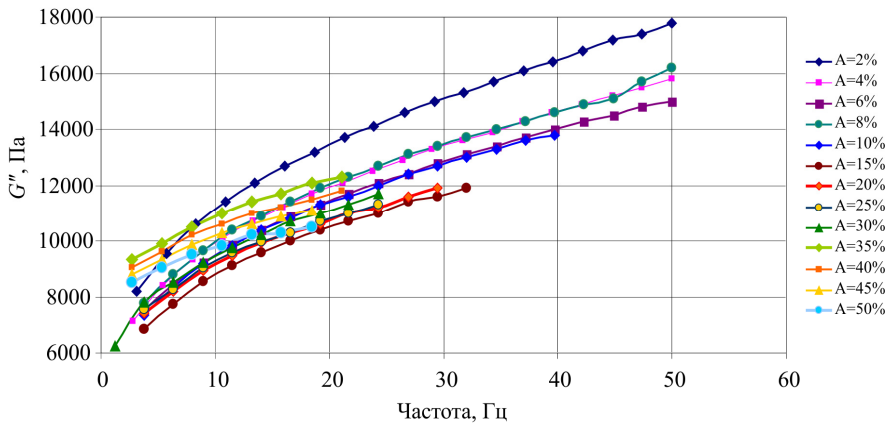


Рис. 3. Зависимость параметра  $G''$  от частоты деформации при различных значениях амплитуды деформации

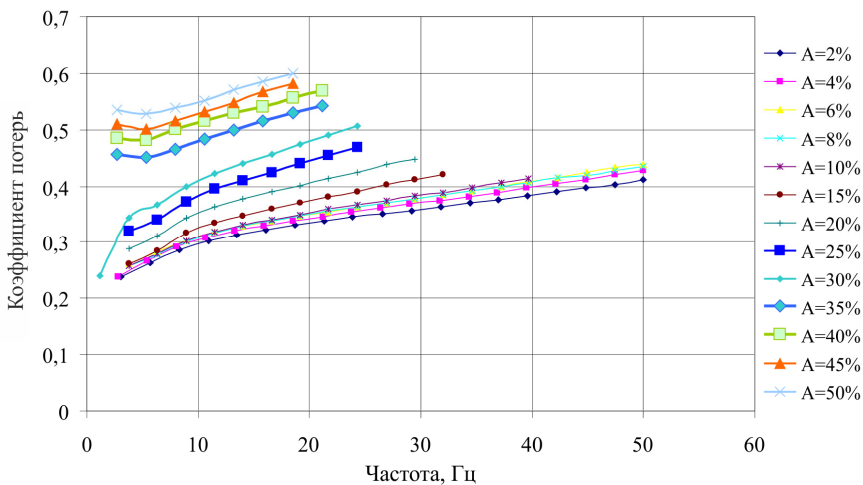


Рис. 4. Зависимость коэффициента потерь от частоты деформации при различных значениях амплитуды деформации

Наблюдается незначительный рост величины  $G'$  с увеличением частоты (рост 20–30 % в исследованном интервале), параметр  $G''$  растет с увеличением частоты (примерно в 2 раза). Параметр  $G'$  зависит от амплитуды в большей степени, чем от частоты, и этот параметр увеличивает свой знак в 2 раза в интервале амплитуд 2–50 %. Параметр  $G''$  в большей степени зависит от частоты (рост в 2 раза), в то время как от амплитуды только на 20 %. Это проявляется на основном параметре – коэффициенте потерь, который находится как отношение  $G'/G''$ . Па-



раметр растет как от частоты, так и от деформации. Зависимость коэффициента потерь от частоты практически линейна и положительна.

Результаты изменения зависимости вязкоупругих свойств данного образца от амплитуды деформации при различных значениях магнитного поля предварительного намагничивания приведены на рис. 5–8.

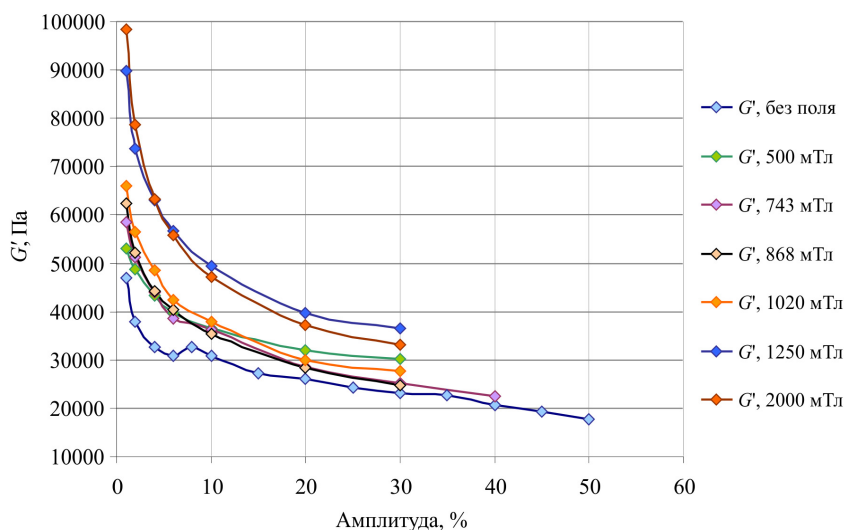


Рис. 5. Зависимость упругой составляющей модуля ( $G'$ ) от амплитуды деформации при частоте  $\sim 10$  Гц для разных магнитных полей предварительного намагничивания

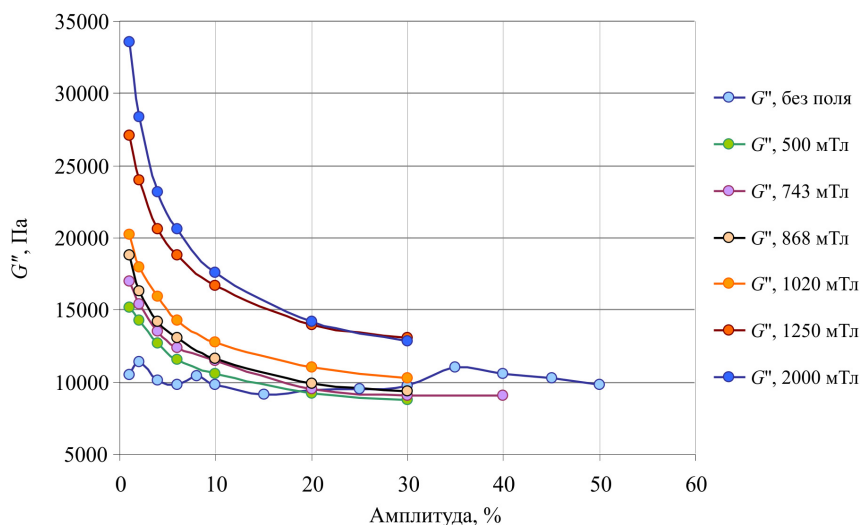


Рис. 6. Зависимость вязкостной составляющей модуля ( $G''$ ) от амплитуды деформации при частоте  $\sim 10$  Гц для разных магнитных полей предварительного намагничивания

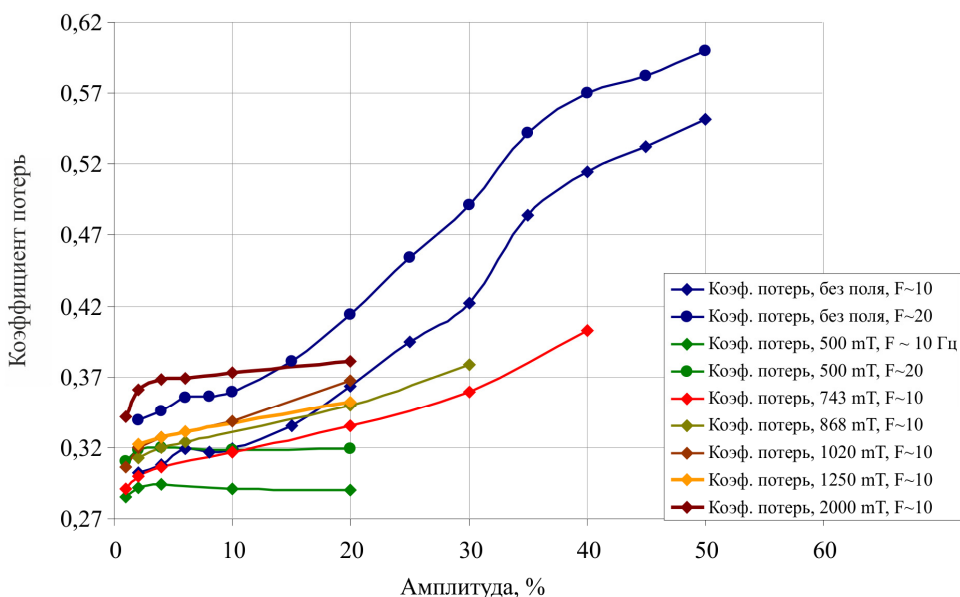


Рис. 7. Зависимость коэффициента потерь от амплитуды деформации при частотах 10 и 20 Гц для разных величин силы прилагаемого поля

Как видно из рис. 5, модуль упругости с увеличением степени намагничивания материала возрастает. Причем модуль упругости в области малых деформаций выше, чем в области больших деформаций. Аналогичная зависимость наблюдается для вязкостной составляющей модуля (см. рис. 6). Зависимость вязкости от амплитуды имеет ниспадающий характер, также в области малых деформаций модуль  $G''$  имеет более высокие значения, чем в области больших деформаций. Общий характер зависимости не изменяется с изменением намагничивающего поля, с увеличением силы поля возрастают численные значения параметра. В целом наблюдался небольшой рост коэффициента потерь с увеличением амплитуды деформации и силы намагничивающего поля. Измерения параметров намагниченного образца при амплитудах свыше 20 % оказались не корректными вследствие проскальзывания ротора прибора над образцом.

На рис. 8 и 9 приведены зависимости параметров  $G'$  и  $G''$  от силы поля предварительного намагничивания при различных амплитудах деформации.

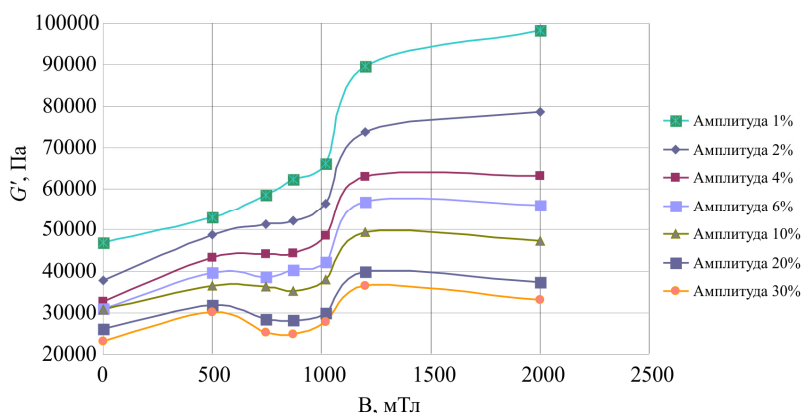


Рис. 8. Зависимость параметра  $G'$  от индукции поля при различных амплитудах деформации

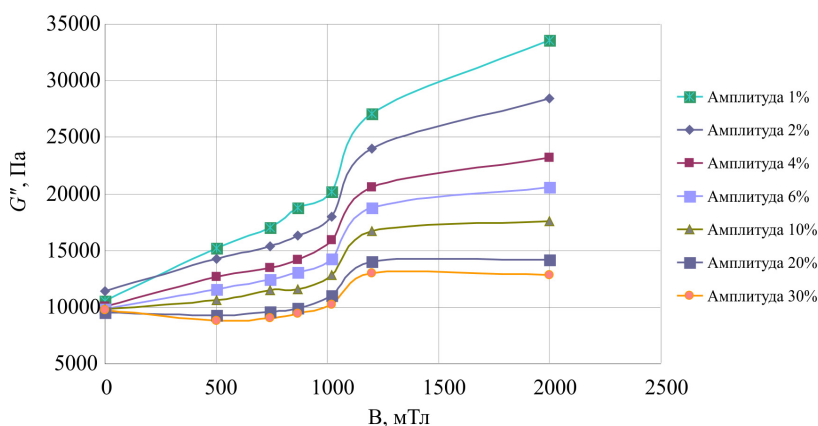


Рис. 9. Зависимость параметра  $G''$  от индукции поля при различных амплитудах деформации

Зависимость модулей от величины намагничивающего поля имеют сложный характер. Оба параметра растут с увеличением значения намагничивающего поля. При общем росте модулей от поля имеется резкий скачок увеличения модулей в области 1–1,2 Тл, после чего интенсивность роста замедляется. Данный скачок можно объяснить процессами внутреннего структурирования магнитного наполнителя внутри полимерной матрицы. В процессе намагничивания остаточная намагниченность наполнителя растет, начинается диполь – дипольное взаимодействие между частицами магнитного наполнителя, что отражается на некотором росте модулей. Начиная с некоторого критиче-

ского значения остаточной намагниченности, процессы диполь-дипольного взаимодействия настолько возрастают, что частицы преодолевают силы упругости полимерной матрицы и притягиваются друг другу, преодолевая силы упругости матрицы. В матрице возникают внутренние агрегаты, при этом напряжение резко возрастает, что сказывается на резком росте модулей. При дальнейшем намагничивании намагничивание в агрегатах частично возрастает, и некоторые частицы дополнительно примыкают к агрегатам. Стоит отметить, что в полях 2 Тл наполнитель приближается к намагниченности насыщения и его остаточная намагниченность перестает возрастать.

Таким образом, МАЭ с магнито жестким наполнителем демонстрирует увеличение вязкоупругости после намагничивания и способен работать как эффективное рабочее тело в пассивных и полуактивных демпфирующих устройствах без систем намагничивания. Следует отметить, что эффекты изменения вязкоупругих свойств в таком материале ниже, чем в композитах с магнитомягким наполнителем, и эффективность его применения будет определяться техническими особенностями конструируемых демпфирующих устройств. Например, при наличии массогабаритных ограничений применение постоянных магнитов и управляющих электромагнитов будет ограничено.

### **3. Изучение демпфирующих свойств МАЭ на модельной установке в режиме горизонтального удара**

Для исследования демпфирующих свойств магнитного эластомера была реализована экспериментальная установка, схема которой показана на рис. 10.

В основе установки лежит полая балка прямоугольного сечения, закрепленная на шарнире на консоли стены. На конце балки установлен боек круглого сечения и датчик ускорения. Напротив бойка, на стене, закрепляется исследуемый образец МАЭ (образец МЭ). Рабочая балка отклоняется на заданный угол от положения равновесия и затем под действием силы тяжести разгоняется и ударяет бойком по образцу. Удары повторяются в форме затухающих колебаний до полного прекращения колебаний балки. Колебания балки в момент удара/отскока по/от образца были измерены датчиком ускорения, закрепленным на бойке и подключенным к плате регистрации L-card e14-440. Для унификации энергетического воздействия балки на образцы различного

размера был проведен расчет энергии удара балки по образцу МАЭ. Размерные характеристики ударного механизма установки и измеряемые параметры представлены на рис. 10.

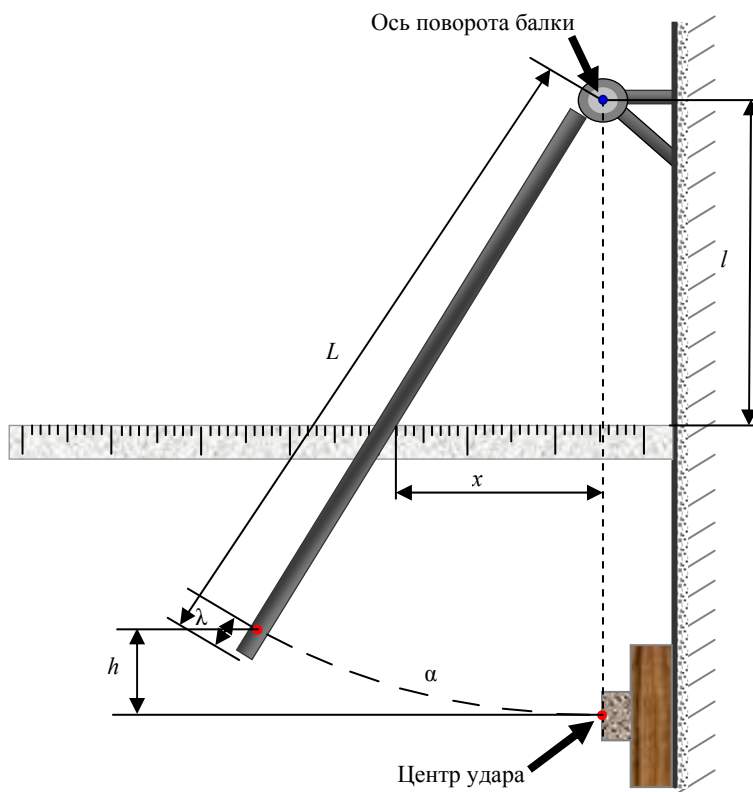


Рис. 10. Схема балки и измеряемые параметры. Основным изменяемым параметром, определяющим энергию удара, был  $x$  – координата отклонения балки вдоль линейки, м;  $h$  – высота отклонения бьющей балки, м;  $\alpha$  – угол отклонения бьющей балки, град;  $l$  – расстояние от оси поворота балки до края линейки, м. Другими параметрами были выбраны следующие:  $L = 0,86$  м – длина бьющей балки, м;  $\lambda = 0,05$  м – расстояние от нижнего конца бьющей балки до центра удара

Конечное значение рассчитанной энергии  $E$  приведено к площади образца и представлено в виде удельной энергии  $\varepsilon$  в Дж/м<sup>2</sup>. В исследованиях ниже использовались цилиндрические образцы МАЭ с диаметром 30 мм и высотой 30 мм.

В данной серии экспериментов исследовали модельный образец МАЭ с магнитомягким наполнителем FeNdB, индексированный (МЖ).

Первоначально исследовался образец, не подверженный воздействию магнитного поля. Затем этот образец устанавливался на плоский постоянный магнит диаметром 50 мм, а удар балки приходился на свободную часть цилиндрического образца. В предыдущей серии экспериментов с образцами МЖ было выяснено, что образец практически не намагничивается в поле до 500 мТл, то есть не имеет остаточную намагниченность. До полей 500 мТл материал ведет себя как магнитомягкий. Далее, в следующей серии, образец МЖ пытались намагнитить импульсным магнитным полем до 2 Тл. Величина магнитного поля в импульсе регулировалась напряжением заряда конденсаторов. Поэтому степень намагниченности является относительной величиной. Предполагается, что при максимальном напряжении 300 В мы получали импульс магнитного поля 2 Т в соответствии с паспортом на установку, и при этом образец намагничивается полностью.

На рис. 11–13 дан пример изменения характера колебаний бойка после удара с энергией  $97 \text{ кДж/м}^2$  для исходного образца и «подмагниченного» в поле постоянного магнита с индукцией 250 мТл. Исследован процесс в 12 точках при энергии удара в интервале 6–700  $\text{кДж/м}^2$ .

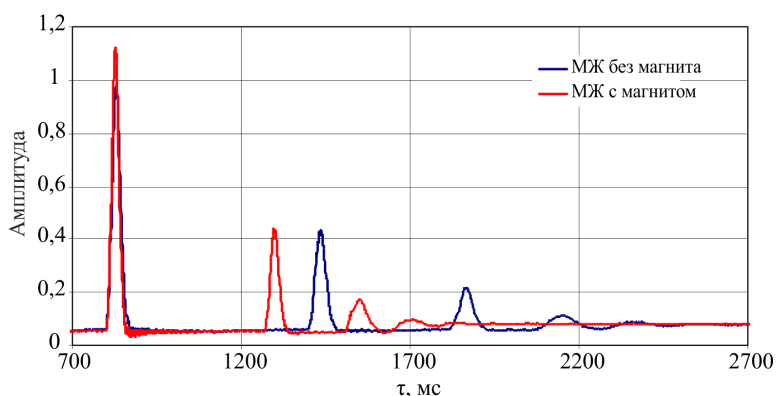


Рис. 11. Зависимость изменений интенсивности ускорения бойка при ударе с энергией  $97 \text{ Дж/м}^2$  по исходному и подмагниченному образцу МАЭ (МЖ)

Как видно из представленных рисунков, намагниченный образец и образец в магнитном поле более эффективно демпфируют удар балки. Интенсивность отскока и число колебаний балки уменьшается.

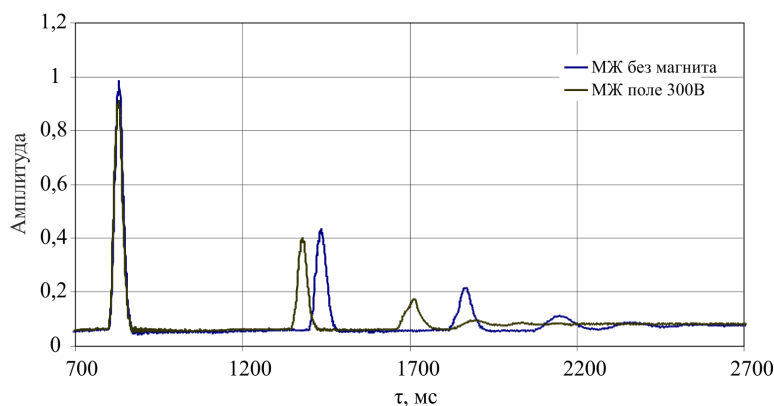


Рис. 12. Зависимость изменений интенсивности ускорения бойка при ударе с энергией  $97 \text{ Дж/м}^2$  по исходному и намагниченному образцу МАЭ (МЖ)

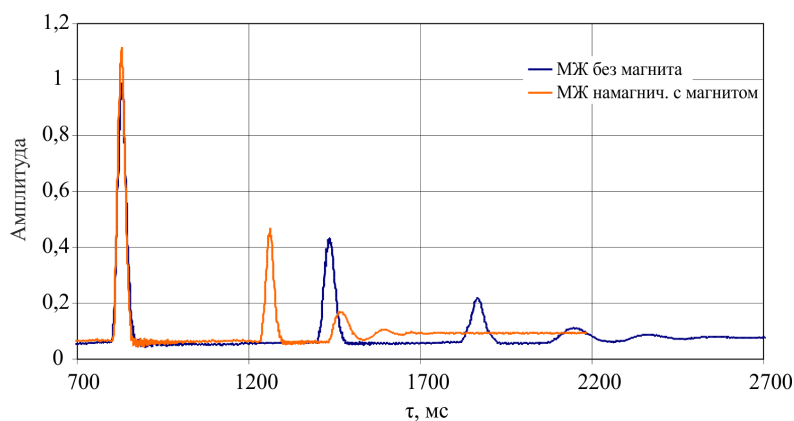


Рис. 13. Зависимость изменений интенсивности ускорения бойка при ударе с энергией  $97 \text{ Дж/м}^2$  по исходному и подмагниченному образцу МАЭ (МЖ) в поле постоянного магнита величиной 250 мТл

Проведено сравнение всех образцов по демпфированию колебаний маятника после удара. Сравнение проведено для всех экспериментов с разной энергией удара. На рис. 14 показаны временные интервалы, взятые для расчетов. Взят интервал времени между точкой соприкосновения бойка с материалом и точкой прекращения колебаний; интенсивность колебаний менее 5 % от максимальной величины. Далее было определено относительное время сокращения времени колебания относительно опыта с исходным образцом в процентах. Результаты расчета относительного времени сокращения колебаний маятника представлены на рис. 15.

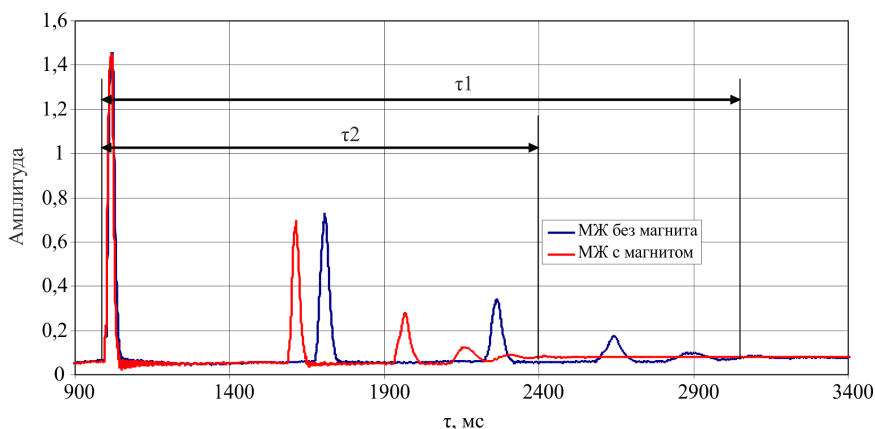


Рис. 14. Схема измерения колебаний маятника для исходного образца и намагниченного

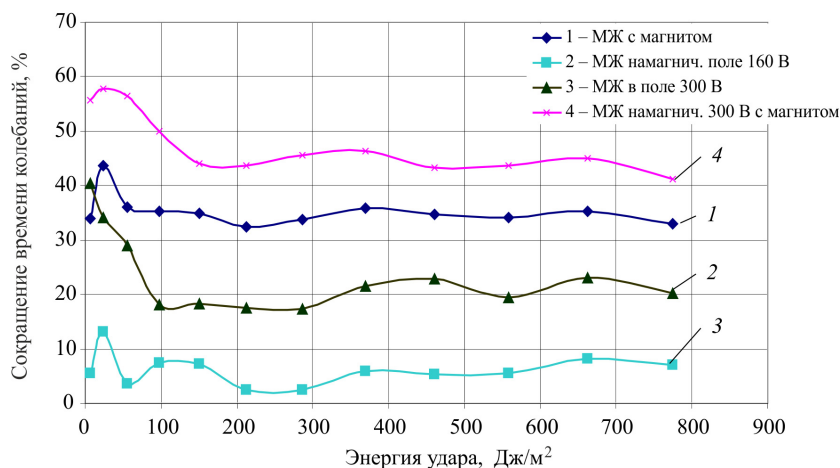


Рис. 15. Зависимость относительного изменения времени колебаний системы от энергии удара для различных вариантов намагничивания образца МАЭ

Из данных, представленных на рис. 15, вытекает, что время колебательных процессов сокращается по мере увеличения намагниченности образца МАЭ. Намагниченный образец с подмагничиванием сокращает время колебаний маятника почти в 2 раза (на 50 %). С другой стороны, нет значительной зависимости по сокращению времени колебаний системы от энергии удара в исследованной области энергий удара. Данный тип эластомера может быть полезным при проектировании автомобильных бамперов [38–42].



#### 4. Магнитные характеристики магнитоактивных эластомеров на основе магнитного наполнителя FeNdB

Для образцов на основе FeNdB были определены основные магнитные характеристики – величина намагниченности насыщения и коэрцитивной силы.

Коэрцитивная сила и намагниченность насыщения образца определялись из полевых зависимостей магнитного момента образцов (петель гистерезиса). Измерение петель гистерезиса осуществлялось на вибрационном магнитометре *Lake Shore 7407*. Все измерения проводились при комнатной температуре в полях до 16 кЭ. Единица измерения магнитного момента, используемая в программном обеспечении магнитометра *Lake Shore* и описании результатов, – emu,  $1 \text{ emu} = 1 \text{ Гс} \cdot \text{см}^3$ .

С помощью вибрационного магнитометра были получены петли гистерезиса для всех образцов второй группы. Измерения проводились в магнитном поле до 16 кЭ.

На рис. 16 приведены петли гистерезиса для образцов на основе эластичной матрицы, наполнитель – FeNdB и FeNdB +  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ .

В табл. 1 дано описание типов исследуемых образцов, а также приведены значения коэрцитивной силы и намагниченности насыщения для образцов на основе FeNdB и FeNdB +  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ . Особенности данной серии экспериментов заключаются в использовании двух типов полимерной матрицы – эластичной и жесткой матриц. Эластичность матрицы регулировали концентрацией пластификатора и отвердителя в процессе полимеризации композита.

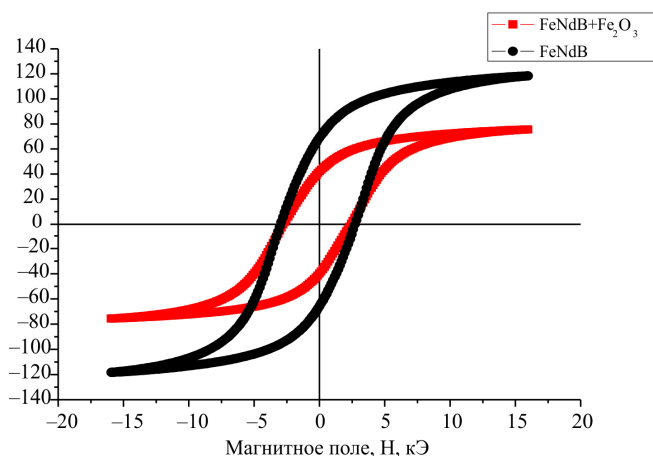


Рис. 16. Графики зависимости магнитного момента образцов  $M$  на основе эластичной матрицы от величины магнитного поля  $H$

Таблица 1

## Коэрцитивная сила и намагниченность насыщения образцов FeNdB

| Образец                                    |                                                              | Коэрцитивная сила $H_c$ , Э | Намагниченность насыщения $M$ , ед/г |
|--------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|
| Эластичная матрица                         | FeNdB (54%) + $\alpha$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (30%) | 2570                        | 75                                   |
|                                            | FeNdB (83%)                                                  | 2850                        | 120                                  |
| Жесткая матрица                            | FeNdB (54%) + $\alpha$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (30%) | 2970                        | 94                                   |
|                                            | FeNdB (83%)                                                  | 2860                        | 140                                  |
| Жесткая матрица на основе эпоксидной смолы | FeNdB (94%)                                                  | 2300–2600                   | 140 150                              |
|                                            | FeNdB (61%) + $\alpha$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (33%) | 2900–3000                   | 100–105                              |

Данные, представленные в таблице, призваны определить основные характеристики магнитных композитов и зависимости изменения этих характеристик при варьировании концентрации магнитного компонента в матрице и эластичных свойств матрицы. Основной целью эксперимента являлось выявление зависимости коэрцитивной силы МАЭ от концентрации магнитного наполнителя и степени эластичности матрицы. Во всех сериях экспериментов были сделаны образцы с наполнителем FeNdB, разбавленным немагнитным оксидом железа  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Разбавление магнитного материала приводит к увеличению расстояния между намагниченными частицами, уменьшению размагничивающего фактора и, соответственно, увеличению измеренной коэрцитивной силы материала. Эффект внесения немагнитного материала отражен в крайнем столбце таблицы, где видно, что намагниченность «разбавленного» образца в среднем на 35 % ниже, чем у неразбавленного. Сравнение двух образцов с жесткой матрицей подтверждает классическое положение: образец с низкой концентрацией магнитного наполнителя имеет более высокую коэрцитивную силу. Наиболее ярко эффект «разбавления» виден при измерении свойств прессованных таблеток со связкой из эпоксидной смолы. Образцы с эластичной матрицей демонстрируют противоположный эффект. Ко-

эрцитивная сила образца с эластичной матрицей имеет наименьшую коэрцитивную силу. Это указывает на то, что в процессе перемагничивания образца частицы магнитожесткого наполнителя переворачиваются механически внутри полимерной матрицы. Данный механизм намагничивания и перемагничивания является уникальным свойством данного МА-эластомера.

## **5. Исследование диэлектрической проницаемости МАЭ в магнитном поле**

Для исследования влияния внешнего магнитного поля на величину диэлектрической проницаемости магнитореологических эластомеров (МРЭ) использовались материалы на основе различных порошков магнитных частиц, а также полимерных матриц с различными упругими свойствами.

Диэлектрическая проницаемость образца определялась из емкости плоского конденсатора. Емкость конденсатора  $C$  вычисляется по формуле

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d},$$

где  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика между обкладками конденсатора;  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная;  $S$  – площадь обкладок конденсатора;  $d$  – расстояние между обкладками.

Таким образом, если измерить емкость пустого конденсатора  $C_0$  емкость конденсатора с образцом  $C$ , то из их отношения можно вычислить величину диэлектрической проницаемости образца:

$$\varepsilon = \frac{C}{C_0}.$$

Емкость конденсатора измерялась с помощью измерителя RLC АМ-3016 фирмы «Актаком» на частотах от 1 до 200 кГц. В измерениях использовались образцы размером 15×8×2 мм, обернутые в бумагу, чтобы исключить проводимость образца. Конденсатор с образцом помещался между полюсами электромагнита. Измерения проводились для двух ориентаций – магнитное поле перпендикулярно плоскости обкладок конденсатора и, соответственно – параллельно. Все измерения проводились при комнатной температуре.

В первую очередь были измерены частотные зависимости – зависимость диэлектрической проницаемости образцов (...) в различных магнитных полях. Измерения проводились на частотах от 1 до 200 кГц. Эти зависимости для случая перпендикулярной ориентации измерительного конденсатора с МРЭ и магнитного поля представлены на рис. 17.

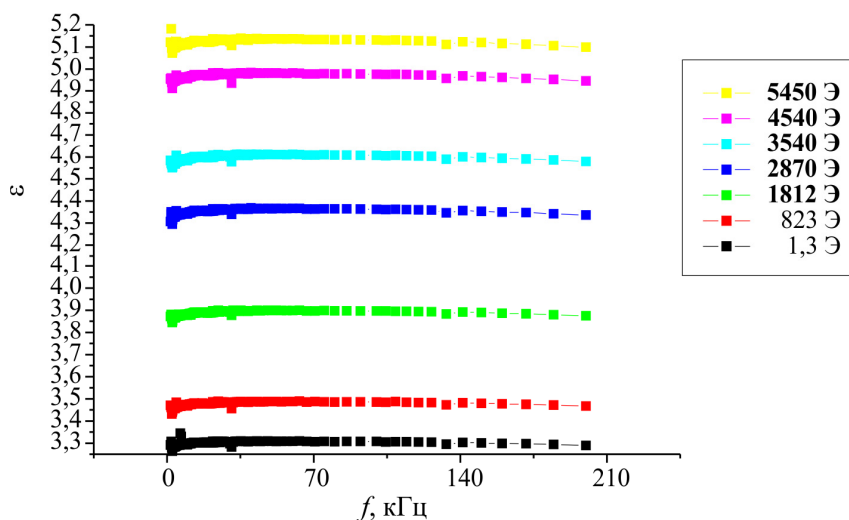


Рис. 17. График зависимости диэлектрической проницаемости образца от частоты в различных магнитных полях. Мелкие частицы, 77 мас.%, перпендикулярная ориентация

Можно отметить, что величина диэлектрической проницаемости не зависит от частоты. Поэтому все последующие измерения проводились на одной частоте – 100 кГц. Для каждого нового образца и новой ориентации проводились измерения по всем частотам. Все измерения показали независимость диэлектрической проницаемости от частоты.

Свойства композитов различного состава, приготовленных в присутствии внешнего магнитного поля 0,2 Тл на основе силиконового каучука и магнитных наполнителей FeNdB и карбонильного железа, представлены в табл. 2. Здесь приведены составы различных композитов и их диэлектрические параметры (1 – тип наполнителя, 2 – массовая концентрация наполнителя, 3 – диэлектрическая проницаемость без поля, 4 – диэлектрическая проницаемость в поле 1,5 Тл, 5 – изменение диэлектрической проницаемости в поле 1.5 Тл).

Таблица 2

Данные по диэлектрической проницаемости образцов МАЭ  
с наполнителями FeNdB и карбонильное железо

| Тип наполнителя    | $C_n, \%$ | $\varepsilon, H=0$ | $\varepsilon, H=1,5 \text{ Тл}$ | Изменение $\varepsilon$ в поле $H=1,5 \text{ Тл}, \%$ |
|--------------------|-----------|--------------------|---------------------------------|-------------------------------------------------------|
| 1                  | 2         | 3                  | 4                               | 5                                                     |
| FeNdB              | 80        | 11                 | 28                              | 150                                                   |
|                    | 70        | 11                 | 25                              | 130                                                   |
|                    | 85        | 11                 | 23                              | 110                                                   |
| Fe <sub>карб</sub> | 80        | 2,1                | 3,7                             | 80                                                    |
|                    | 60        | 2,1                | 3,1                             | 48                                                    |
|                    | 85        | 2,1                | 2,8                             | 33                                                    |

Как видно из табл. 2, имеются оптимальные концентрации магнитного наполнителя, при которых изменение диэлектрической проницаемости максимально. При уменьшении концентрации изменение диэлектрической проницаемости уменьшается вследствие уменьшения концентрации активного компонента. При высокой концентрации наполнения эффект также уменьшается вследствие невозможности перестройки структуры композита под действием внешнего магнитного поля из-за стерического фактора. Другими словами, частицы настолько близко находятся друг к другу, что взаимное их перемещение под действием магнитного поля затруднено.

Диэлектрическая проницаемость магнитного эластомера меняется под действием внешнего магнитного поля вплоть до 150 % в случае FeNdB наполнителя и до 80 % для Fe наполнителя. Полевая зависимость динамической диэлектрической проницаемости имеет существенно нелинейный характер.

На рис. 18 приведены кривые зависимости магнитодиэлектрического эффекта при различных направлениях внешнего магнитного поля.

Как видно из рис. 18, наблюдается значительная анизотропия динамической диэлектрической проницаемости МАЭ по отношению к взаимной ориентации постоянного магнитного поля и переменного электрического поля. Величина эффекта достигает значительной величины (более 150 %) и зависит от типа магнитного наполнителя МРЭ и направления приложенного поля. Для образца, состоящего из полимерной матрицы без магнитных частиц, изменение диэлектрической проницаемости под действием внешнего магнитного поля в пределах ошибки обнаружено не было.

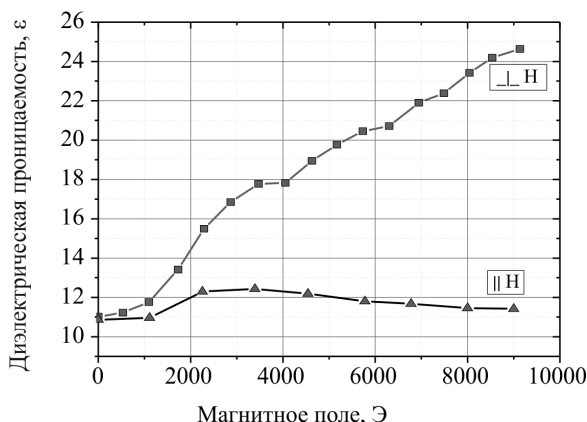


Рис. 18. Зависимость диэлектрической проницаемости МАЭ на основе магнитного наполнителя FeNdB от величины и направления магнитного поля

Рассмотренное поведение МАЭ в магнитных полях может объясняться смещением и поворотом магнитных частиц внутри материала под действием приложенного магнитного поля. Смещение частиц друг относительно друга в материале эластомера, расположенного между двумя пластинами плоского конденсатора, приводит к изменению эффективной диэлектрической проницаемости материала, данное изменение регистрируется с помощью измерения емкости конденсатора. Поскольку смещение частиц происходит в упругой матрице полимера, возникают упругие силы со стороны матрицы, зависящие от параметров полимерного материала. Исследование влияния магнитного поля на диэлектрическую проницаемость в материалах на основе матриц с различными упругими характеристиками показало, что чем эластичнее полимер, тем более значительный эффект наблюдается, что объясняется более существенным смещением частиц в эластичной матрице по сравнению с материалом на основе менее упругой матрицы.

Анализируя поведение материала и всю совокупность свойств, можно сделать заключение, что кроме диполь-дипольного взаимодействия между частицами происходят процессы обратимого перемещения магнитных частиц внутри полимерной матрицы под действием магнитного поля. То есть частицы магнитного наполнителя под действием магнитного поля и диполь-дипольного взаимодействия образуют цепеподобные структуры внутри полимерной матрицы в направлении

магнитного поля. В случае использования в качестве магнитного наполнителя магнитожесткого наполнителя, например порошка FeNdB, наблюдаются процессы вращения магнитного наполнителя внутри полимерной матрицы.

Таким образом, многочисленные исследования данного материала открывают все новые и новые его свойства и соответственно расширяют возможные области его применения.

Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

### **Библиографический список**

1. Pat. US5974856. Method for allowing rapid evaluation of chassis elastomeric devices in motor vehicles. 1999.
2. Pat. EP0784163. Variable stiffness bushing using magnetorheological elastomers. 1997.
3. Pat. US5814999. Method and apparatus for measuring displacement and force. 1999.
4. Pat. US7430788. Magnetorheological nanocomposite elastomer for releasable attachment applications. 2009.
5. Jolly M.R., Carlson J.D., Munoz B.C., Bullions T.A. The magnetoviscoelastic response of elastomer composites consisting of ferrous particles embedded in a polymer matrix // *J. Intelligent Mat. Syst. Struct.* – 1999. – No. 67. – P. 613–622.
6. Magnetostrictive Phenomena in Magnetorheological Elastomers / J.M. Ginder, S.M. Clark, W.F. Schlotter, M.E. Nichols // *International Journal of Modern Physics.* – 2002. – No. 16. – P. 2412–2418.
7. Bellan C., Bossiss G. Field Dependence of Viscoelastic Properties of MR Elastomers // *International Journal of Modern Physics.* – 2002. – No. 16. – P. 2447–2453.
8. 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.
9. Zhou G.Y. Shear properties of a magnetorheological elastomer // *Smart Mater. Struct.* – 2003. – No 12. – P. 139–146.
10. Zhou G.Y., Zhang P.Q. Investigation of the dynamic mechanical behavior of the double-barreled configuration in a magnetorheological fluid damper // *Smart Mater. Struct.* – 2002. – No 11. – P. 230–238.

11. Zhou G.Y., Jiang Z.Y. Deformation in magnetorheological elastomer and elastomer-ferromagnet composite driven by a magnetic field // *Smart Mater. Struct.* – 2004. – No. 13. – P. 309–316.
12. Zhou G.Y., Li J.R. Dynamic behavior of a magnetorheological elastomer under uniaxial deformation: I. Experiment // *Smart Mater. Struct.* – 2003. – No. 12. – P. 859–872.
13. Zhou G.Y., Wang Q. A linear time-variant system for signal modulation by use of magnetorheological elastomer-suspended beams // *Smart Mater. Struct.* – 2005. – No. 14. – P. 1154–1162.
14. Zhou G.Y., Wang Q. Magnetorheological elastomer-based smart sandwich beams with nonconductive skins // *Smart Mater. Struct.* – 2005. – No. 14. – P. 1001–1009.
15. Zhou G.Y., Wang Q. Design of a smart piezoelectric actuator based on a magnetorheological elastomer // *Smart Mater. Struct.* – 2005. – No. 14. – P. 504–510.
16. Zhou G.Y. Complex shear modulus of a magnetorheological elastomer // *Smart Mater. Struct.* – 2004. – No. 13. – P. 1203–1210.
17. Zhou G.Y., Wang Q. Study on the adjustable rigidity of magnetorheological-elastomer-based sandwich beams // *Smart Mater. Struct.* – 2006. – No. 15. – P. 59–74.
18. Guan X., Dong X., Ou J. Magnetostrictive effect of magnetorheological elastomer // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials.* – 2008. – № 320 – C. 158–163.
19. Filipcsei G., Zrinyi M. Preparation and Responsive Prospects of Magnetically Soft Poly (N-isopropylacrylamide) Gels // *Macromolecules.* 2000. – No. 33. – P. 1716–1719.
20. Zrinyi M., Feher J., Filipcsei G. Novel Gel Actuator Containing TiO<sub>2</sub> Particles Operated under Static Electric field // *Macromolecules.* – 2000. – No. 33. – P. 5751–5753.
21. Szabo D., Szeghy G., Zrinyi M. Shape Transition of Magnetic Field Sensitive Polymer Gels // *Macromolecules.* – 1998. – No. 31. – P. 6541–6548.
22. Interaction of Monodisperse Poly (N-isopropylacrylamide) Microgel Particles with Sodium Dodecyl Sulfate in Aqueous Solution / T. Gila'nyi, I. Varga, R. Me'szaros, G. Filipcsei, M. Zrinyi // *Langmuir.* – 2001. – No. 17. – P. 4764–4769.



23. Raikher Yu.L., Stolbov O.V. Magnetodeformational effect in ferrogel objects // *J. Magn. Magn. Mater.* – 2005. – Vol. 289. – P. 62–65

24. Raikher Yu.L., Stolbov O.V. Magnetodeformational effect in ferrogel samples // *J. Magn. Magn. Mater.* – 2003. – Vol. 258. – P. 477–479.

25. Raikher Yu.L., Rusakov V.V. Viscoelastic ferrogel: Dynamic magnetic susceptibilities // *Brazilian J. Phys.* – 2001. – Vol. 31. – No. 3. – P. 366–379.

26. The Influence of a Magnetic Field on the Elastic and Viscous Properties of Magnetoelastics / L.V. Nikitin, L.S. Mironova, G.V. Stepanov, A.N. Samus // *Polymer Science, Ser. A.* – 2001. – Vol. 43, no. 4. – P. 443–450.

27. Properties of magnetoelastics synthesized in external magnetic / L.V. Nikitin, G.V. Stepanov, L.S. Mironova, A.N. Samus // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials.* – 2003. – Vol. 258–259. – P. 468–470.

28. The magnetic, elastic, structural and magnetodeformational properties of magnetoelastics / L.V. Nikitin, L.S. Mironova, K.G. Kornev, G.V. Stepanov // *Polymer science, ser. A.* – 2004. – Vol. 46, no. 3. – P. 301–309.

29. Magnetodeformational effect and effect of shape memory in magnetoelastics / L.V. Nikitin, G.V. Stepanov, L.S. Mironova, A.I. Gorbunov // *Journal of magnetism and magnetic materials.* – 2004. – No. 272–276. – P. 2072–2073.

30. Raikher Yu.L., Stolbov O.V., Stepanov G.V. Shape instability of a magnetic elastomer membrane // *J. Phys. D: Applied Physics (Fast Track Communications).* – 2008. – Vol. 41(15): 152002. – 4 p.

31. Raikher Yu.L., Stolbov O.V. Numerical modeling of large field-induced strains in ferroelastic bodies: Continuum approach // *J. Phys.: Condensed Matter.* – 2008. – Vol. 20(20): 204126. – 5 p.

32. 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 // *J. Phys.: Condensed Matter.* – 2008. – Vol. 20(20): 204121. – 5 p.

33. Farshad M., Benine A. Magnetoactive elastomer composites // *Polymer Testing.* – 2004. – No. 23. – P. 347–353.

34. Farshad M., Le Roux M. Compression properties of magnetostrictive polymer composite gels // *Polymer Testing.* – 2005. – No. 24. – P. 163–168.

35. Novel highly elastic magnetic materials for dampers and seals I: Preparation and characterization of the elastic materials / S. Abramchuk, E. Kramarenko, G. Stepanov, L.V. Nikitin, G. Filipcsei, A.R. Khokhlov, M. Zrinyi // *Polymers for Advanced Technologies*. – 2007. – Vol. 18. – No. 11. – P. 883–890.

36. Effect of a Homogeneous Magnetic Field on the Viscoelastic Behavior of Magnetic Elastomers / G.V. Stepanov, S.S. Abramchuk, D.A. Grishin, L.V. Nikitin, E.Yu. Kramarenko, A.R. Khokhlov // *Polymer*. – 2007. – Vol. 48. – P. 488–495.

37. New Composite Elastomers with Giant Magnetic Response / A.V. Chertovich, G.V. Stepanov, E.Y. Kramarenko, A.R. Khokhlov // *Macromolecular Materials and Engineering*. – 2010. – Vol. 295. – No. 4. – P. 336–341.

38. Magnitorheological elastomer with memory share effect as a component of the energy absorbing's cover for the bumper of a vehicle / I. Balabin, V. Bogdanov, D. Borin, F. Adam, G. Stepanov // *Automobil Industry*. – 2010. – No. 10.

39. Balabin I., Bogdanov V., Jovanis S. Stossstänger von Kfz als effektive Träger des Schutztraumafunktion von Verkehrsteilnehmer // *Journal of Association Automotive Engineering*. – 2010. – No. 5. – P. 31–35.

40. Einsatz des MR-elastomers in Energieabsorbtionsaufbau der Fahrzeugstossstange / I. Balabin, V. Bogdanov, D. Borin, G. Stepanov, D. Sementenko // *Zeitschrift der Assoziation der Automotive Ingenieure*. – 2010. – No. 6 (in Russian).

41. Bogdanov V., Borin D., Bokov R. Investigation and Optimization the strengths and rigids Parameters of MRE, used in the Konstruktions of safety Bumpers of Vehicles // *Collection N. Novgorod N.I. Lobatschewski State University*. – 2011. – No. 4.

42. Balabin I., Bogdanov V. Safety of Vehicles: Dualism of modern intellectual Systems demand the new Classifications // *Automobil Industry*. – 2012. – No. 9.

## **References**

1. Method for allowing rapid evaluation of chassis elastomeric devices in motor vehicles. Patent US No. 5974856, 1999.

2. Variable stiffness bushing using magnetorheological elastomers. Patent EP No. 0784163, 1997.

3. Method and apparatus for measuring displacement and force. Patent US No. 5814999, 1999.

4. Magnetorheological nanocomposite elastomer for releasable attachment applications. Patent US No. 7430788, 2009.

5. Jolly M.R., Carlson J.D., Munoz B.C., Bullions T.A. The magnetoviscoelastic response of elastomer composites consisting of ferrous particles embedded in a polymer matrix. *J. Intelligent Mat. Syst. Struct.*, 1999, no. 67, pp. 613-622.

6. Ginder J.M., Clark S.M., Schlotter W.F. and Nichols M.E. Magnetostrictive Phenomena in Magnetorheological Elastomers. *International Journal of Modern Physics*, 2002, no. 16, pp. 2412-2418.

7. Bellan C., Bossiss G. Field Dependence of Viscoelastic Properties of MR Elastomers. *International Journal of Modern Physics*, 2002, no. 16, pp. 2447-2453.

8. 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.

9. Zhou G.Y. Shear properties of a magnetorheological elastomer. *Smart Mater. Struct.*, 2003, no. 12, pp. 139-146.

10. Zhou G.Y., Zhang P.Q. Investigation of the dynamic mechanical behavior of the double-barreled configuration in a magnetorheological fluid damper. *Smart Mater. Struct.*, 2002, no 11, pp. 230-238.

11. Zhou G.Y., Jiang Z.Y. Deformation in magnetorheological elastomer and elastomer-ferromagnet composite driven by a magnetic field. *Smart Mater. Struct.*, 2004, no. 13, pp. 309-316.

12. Zhou G.Y., Li J.R. Dynamic behavior of a magnetorheological elastomer under uniaxial deformation: I. Experiment. *Smart Mater. Struct.*, 2003, no. 12, pp. 859-872.

13. Zhou G.Y., Wang Q. A linear time-variant system for signal modulation by use of magnetorheological elastomer-suspended beams. *Smart Mater. Struct.*, 2005, no. 14, pp. 1154-1162.

14. Zhou G.Y., Wang Q. Magnetorheological elastomer-based smart sandwich beams with nonconductive skins. *Smart Mater. Struct.*, 2005, no. 14, pp. 1001-1009.

15. Zhou G.Y., Wang Q. Design of a smart piezoelectric actuator based on a magnetorheological elastomer. *Smart Mater. Struct.*, 2005, no. 14, pp. 504-510.

16. Zhou G.Y Complex shear modulus of a magnetorheological elastomer. *Smart Mater. Struct.*, 2004, no. 13, pp. 1203-1210.
17. Zhou G.Y., Wang Q. Study on the adjustable rigidity of magnetorheological-elastomer-based sandwich beams. *Smart Mater. Struct.*, 2006, no. 15, pp. 59-74.
18. Guan X., Dong X., Ou J. Magnetostrictive effect of magnetorheological elastomer. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2008, no. 320, pp. 158-163.
19. Filipcsei G., Zrinyi M. Preparation and Responsive Prospects of Magnetically Soft Poly (N-isopropylacrylamide) Gels. *Macromolecules*, 2000, no. 33, pp. 1716-1719.
20. Zrinyi M., Feher J., Filipcsei G. Novel Gel Actuator Containing TiO<sub>2</sub> Particles Operated under Static Electric field. *Macromolecules*, 2000, no. 33, pp. 5751-5753.
21. Szabo D., Szeghy G., Zrinyi M. Shape Transition of Magnetic Field Sensitive Polymer Gels. *Macromolecules*, 1998, no. 31, pp. 6541-6548.
22. Gila'nyi T., Varga I., Me'szaros R., Filipcsei G. and Zr'inyi M. Interaction of Monodisperse Poly(N-isopropylacrylamide) Microgel Particles with Sodium Dodecyl Sulfate in Aqueous Solution. *Langmuir*, 2001, no. 17, pp. 4764-4769.
23. Raikher Yu.L., Stolbov O.V. Magnetodeformational effect in ferrogel objects. *J. Magn. Magn. Mater.*, 2005, vol 289, pp. 62-65
24. Raikher Yu.L., Stolbov O.V. Magnetodeformational effect in ferrogel samples. *J. Magn. Magn. Mater.*, 2003, vol. 258, pp. 477-479.
25. Raikher Yu.L., Rusakov V.V. Viscoelastic ferrogel: Dynamic magnetic susceptibilities. *Brazilian J. Phys.*, 2001, vol. 31, no. 3, pp. 366-379.
26. Nikitin L.V., Mironova L.S., Stepanov G.V., Samus A.N. The Influence of a Magnetic Field on the Elastic and Viscous Properties of Magnetoelastics. *Polymer Science, Ser. A.*, 2001, vol. 43, no. 4, pp. 443-450.
27. Nikitin L.V., Stepanov G.V., Mironova L.S. and Samus A.N. Properties of magnetoelastics synthesized in external magnetic. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2003, vol. 258-259, pp. 468-470.
28. Nikitin L.V., Mironova L.S., Kornev K.G., Stepanov G.V. The magnetic, elastic, structural and magnetodeformational properties of magnetoelastics. *Polymer science, Ser. A.*, 2004, vol. 46, no. 3, pp. 301-309.
29. Nikitin L.V., Stepanov G.V., Mironova L.S., Gorbunov A.I. Magnetodeformational effect and effect of shape memory in magnetoelastics.

*Journal of magnetism and magnetic materials*, 2004, no. 272-276, pp. 2072-2073.

30. Raikher Yu.L., Stolbov O.V., Stepanov G.V. Shape instability of a magnetic elastomer membrane. *J. Phys. D: Applied Physics (Fast Track Communications)*, 2008, vol. 41(15): 152002 (4 pages).

31. Raikher Yu.L., Stolbov O.V. Numerical modeling of large field-induced strains in ferroelastic bodies: Continuum approach. *J. Phys.: Condensed Matter*, 2008, vol. 20(20): 204126 (5 pages).

32. 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.: Condensed Matter*, 2008, vol. 20(20): 204121 (5 pages).

33. Farshad M., Benine A. Magnetoactive elastomer composites. *Polymer Testing*, 2004, no. 23, pp. 347-353.

34. Farshad M., Le Roux M. Compression properties of magnetostrictive polymer composite gels. *Polymer Testing*, 2005, no. 24, pp. 163-168.

35. Abramchuk S., Kramarenko E., Stepanov G., Nikitin L.V., Filipcsei G., Khokhlov A.R., Zrinyi M. Novel highly elastic magnetic materials for dampers and seals I: Preparation and characterization of the elastic materials. *Polymers for Advanced Technologies*, 2007, vol. 18, no. 11, pp. 883-890.

36. Stepanov G.V., Abramchuk S.S., Grishin D.A., Nikitin L.V., Kramarenko E.Yu., Khokhlov A.R. Effect of a Homogeneous Magnetic Field on the Viscoelastic Behavior of Magnetic Elastomers. *Polymer*, 2007, vol. 48, pp. 488-495.

37. Chertovich A.V., Stepanov G.V., Kramarenko E.Y., Khokhlov A.R. New Composite Elastomers with Giant Magnetic Response. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2010, vol. 295, no. 4, pp. 336-341.

38. Balabin I., Bogdanov V., Borin D., Adam F., Stepanov G. Magnitorheological elastomer with memory share effect as a component of the energy absorbing's cover for the bumper of a vehicle. *Automobil Industry*, 2010, no. 10.

39. Balabin I., Bogdanov V., Jovanis S. Stossstanger von Kfz als effektive Träger des Schutztraumafunktion von Verkehrsteilnehmer. *Journal of Association Automotive Engineering*, 2010, no. 5, pp. 31-35.

40. Balabin I., Bogdanov V., Borin D., Stepanov G., Semerenko D. Einsatz des MR-elastomers in Energieabsorbtionsaufbau der Fahrzeugstoss-

stange. *Zeitschrift der Assoziation der Automotive Ingenieure*, 2010, no. 6, (in russian).

41. Bogdanov V., Borin D., Bokov R. Investigation and Optimization the strengths and rigids Parameters of MRE, used in the Construktions of safety Bumpers of Vehicles. *Collection N. Novgorod N.I. Lobatschewski State University*, 2011, no. 4.

42. Balabin I., Bogdanov V. Safety of Vehicles: Dualism of modern intellectual Systems demand the new Classifications. *Automobil Industry*, 2012, no. 9.

### Об авторах

**Степанов Геннадий Владимирович** (Москва, Россия) – научный сотрудник Государственного научно-исследовательского института химии и технологии элементоорганических соединений (105118, Москва, Шоссе Энтузиастов, 38, e-mail: gstepanov@mail.ru).

**Крамаренко Елена Юльевна** (Москва, Россия) – доктор физико-математических наук, профессор Физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (119991, Москва, Ленинские горы, МГУ, д. 1, стр. 2, e-mail: kram@polly.phys.msu.ru).

**Перов Николай Сергеевич** (Москва, Россия) – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры магнетизма физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (119991, Москва, Ленинские горы, МГУ, д. 1, стр. 2, e-mail: perov@magn.ru).

**Семисалова Анна Сергеевна** (Москва, Россия) – кандидат физико-математических наук, сотрудник кафедры магнетизма физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (119991, Москва, Ленинские горы, МГУ, д. 1, стр. 2, e-mail: semisalova@magn.ru).

**Борин Дмитрий Юрьевич** (Дрезден, Германия) – кандидат технических наук, заведующий кафедрой динамики магнитной жидкости Технического университета Дрездена (01062, Дрезден, Германия, e-mail: dmitry.borin@tu-dresden.de).

**Богданов Владимир Викторович** (Москва, Россия) – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры сопротивления материалов Московского государственного машиностроительного университета (107023, г. Москва, ул. Б. Семеновская, 38, e-mail: bogdanov@mami.ru).

**Семеренко Денис Алексеевич** (Москва, Россия) – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (105005, г. Москва, 1-я Бауманская 5, e-mail: infavorem@mail.ru).

**Бахтияров Антон Велитович** (Москва, Россия) – младший научный сотрудник Государственного научно-исследовательского института химии и технологии элементоорганических соединений (105118, г. Москва, Шоссе Энтузиастов, 38, e-mail: abakhtia@gmail.com).

**Свиридова Лилия Вадимовна** (Москва, Россия) – инженер, Государственный научно-исследовательский институт химии и технологии элементоорганических соединений (105118, г. Москва, Шоссе Энтузиастов 38, e-mail: mumilina@yandex.ru).

**Стороженко Павел Аркадьевич** (Москва, Россия) – профессор Государственного научно-исследовательского института химии и технологии элементоорганических соединений (105118, г. Москва, Шоссе Энтузиастов, 38).

### **About the authors**

**Stepanov Gennadiy Vladimirovich** (Moscow, Russian Federation) – M.Sc. State Scientific Research Institute of Chemistry and Technology of Organoelement Compounds (38, Shosse Enthuziastov, 105118, Moscow, Russian Federation, e-mail: gstepanov@mail.ru).

**Kramarenko Elena Yulyevna** (Moscow, Russian Federation) – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Department of Physics, Lomonosov Moscow State University (dom 1, str. 2, Leninskie Gory, 119991, Moscow, Russian Federation, e-mail: kram@polly.phys.msu.ru).

**Perov Nikolai Sergeevich** (Moscow, Russian Federation) – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Department of Physics, Lomonosov Moscow State University (1/b.2, d. 1, str. 2, Leninskie Gory, 119991, Moscow, Russian Federation, e-mail: perov@magn.ru).

**Semisalova Anna Sergeevna** (Moscow, Russian Federation) – Ph.D. in Physics and Mathematics, Physicist, Department of Magnetism, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University (1/b.2, d. 1, str. 2, Leninskie Gory, 119991, Moscow, Russian Federation, e-mail: semisalova@magn.ru).

**Borin Dmitriy Yurievich** (Dresden, Germany) – Ph.D. in Technical Sciences, Technische Universität Dresden, Chair of Magnetofluidynamics (01062, Dresden, Germany, e-mail: dmitry.borin@tu-dresden.de).

**Bogdanov Vladimir Viktorovich** (Moscow, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Strength of Materials, Moscow State University of Mechanical Engineering (38, ul. Bolshaya Semenovskaya, 107023, Moscow, Russian Federation, e-mail: bogdanov@mami.ru).

**Semerenko Denis Alekseyevich** (Moscow, Russian Federation) – Ph.D. in Physical and Mathematical Sciences, Moscow State Technical University after N.E. Bauman (5, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya st., 105005, Bldg.1, Moscow, Russian Federation, e-mail: infavorem@mail.ru).

**Bakhtiarov Anton Velitovich** (Moscow, Russian Federation) – M.Sc. Faculty of Physical Chemistry, Department of Materials of Quantum Electronics. Russian University of Chemical Technologies (38, Shosse Entuziastov, 111123, State Research Institute for Chemical Technologies of Organoelement Compounds, Moscow, Russian Federation, e-mail: abakhtia@gmail.com).

**Sviridova Liliya Vadimovna** (Moscow, Russian Federation) – M.Sc. State Scientific Research Institute of Chemistry and Technology of Organoelement Compounds (38, Shosse Enthuziastov, 105118, Moscow, Russian Federation, e-mail: mumilina@yandex.ru).

**Storozhenko Pavel Arkadievich** (Moscow, Russian Federation) – Prof. State Scientific Research Institute of Chemistry and Technology of Organoelement Compounds (38, Shosse Entuziastov, 105118, Moscow, Russian Federation, e-mail: gstepanov@mail.ru).

Получено 04.03.2013