

Исследование динамических и механических свойств магнитоактивных эластомеров с высокопроницаемым наполнителем при комплексном магнитотемпературном воздействии

М.А. ВАСИЛЬЕВА ✉, Д.О. НАГОРНОВ, Г.А. ОРЛОВ

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

✉ saturn.sun@mail.ru, Vasileva_MA@pers.spmi.ru

Ссылка для цитирования оригинальной статьи: Vasilyeva, M.; Nagornov, D.; Orlov, G. Research on Dynamic and Mechanical Properties of Magnetoactive Elastomers with High Permeability Magnetic Filling Agent at Complex Magneto-Temperature Exposure. *Materials* 2021, 14, 2376. <https://doi.org/10.3390/ma14092376>

Аннотация: Мы рассматриваем магнитоактивный эластомер как потенциально применимый материал для изготовления рабочего канала магнитного насосного агрегата. В ходе исследования образцы подвергались воздействию магнитного поля, температурного поля и их комбинации для оценки изменения упруго-прочностных свойств конечного материала. Для приготовления образцов использовались высокопроницаемые магнитные наполнители различных размеров в диапазоне концентраций 50–70 %. Образцы изготавливались с изотропной и анизотропной структурой. Исследования показали, что при использовании наполнителя с относительно крупной фракцией материал обладает более стабильными динамическими и механическими характеристиками: прочность образца на разрыв увеличивается в среднем на 38 %. При совместном воздействии на материал магнитного и температурного полей его упругость и прочность увеличиваются в среднем на 30 % по сравнению с материалом без внешнего воздействия. На основании полученных результатов обоснован состав и структурная организация материала, обладающего наилучшим комплексом упруго-прочностных характеристик. Для изготовления трубы насосного агрегата предпочтительно использовать изотропный магнитоактивный эластомер с более крупным наполнителем, содержание которого составляет около 60 %.

Ключевые слова: композиционные полимеры; магнитоактивные эластомеры; динамические и механические свойства; концентрация; анизотропия; мелкозернистость.

Research on Dynamic and Mechanical Properties of Magnetoactive Elastomers with High Permeability Magnetic Filling Agent at Complex Magneto-Temperature Exposure

Maria A. VASILYEVA ✉, Dmitriy O. NAGORNOV and Georgiy A. ORLOV

Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia

✉ saturn.sun@mail.ru, Vasileva_MA@pers.spmi.ru

Abstract: We consider magnetically active elastomer as a potentially applicable material for manufacturing a working channel of a magnetic pump unit. During the study, the samples were exposed to a magnetic field, a temperature field, and their combination to assess the change in the elastic-strength properties of the final material. For the preparation of samples, high permeability magnetic fillers of various sizes were used in the concentration range of 50–70%. Samples were made with an isotropic and an anisotropic structure. Studies have shown that when using a filler with a relatively coarse fraction, the material has more stable dynamic and mechanical characteristics: the tensile strength of the sample increases by an average of 38%. With the combined effect of magnetic and temperature fields on the material, its elasticity and strength increase by an average of 30% in comparison with the material without external influence. Based on the results obtained, the composition and structural organization of the material, which has the best complex of elastic strength characteristics, has been substantiated. For the manufacture of a pumping unit tube, it is preferable to use an isotropic magnetoactive elastomer with a coarser filler content of about 60%.

Keywords: composite polymers; magnetoactive elastomers; dynamic and mechanical properties; concentration; anisotropy; fineness.

* Перевод подготовлен для повышения интереса русскоязычной аудитории к данной статье.

© 2021 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

© Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II (перевод), 2024.

1. Введение

Магнитоактивные эластомеры (МАЭ) представляют собой новый класс материалов. Под воздействием внешнего магнитного поля они способны изменять свои механические свойства и линейные размеры. В этом материале присутствует сильное магнитное дипольное взаимодействие частиц наполнителя. От него зависит величина намагниченности насыщения. Это приводит к использованию материалов с высоким содержанием железа или кобальта в качестве наполнителя [1-4]. Благодаря магнитореологическим свойствам этого материала в последние годы широко изучаются возможности его применения в аэрокосмической, автомобильной, строительной промышленности и медицине [4-9].

Одним из перспективных направлений применения магнитоактивных эластомеров является магнитный насос природного типа, разрабатываемый в Санкт-Петербургском горном университете (Санкт-Петербург, Россия). Рабочий канал этого насоса изготовлен из МАЭ. Площадь его свободного сечения зависит от свойств транспортируемого вещества (плотности, вязкости и т.д.). Активатор насосного агрегата генерирует электромагнитные импульсы в соответствии с заданным алгоритмом. Рабочий канал МАЭ деформируется под воздействием внешнего магнитного поля. Процесс последовательного сжатия участков рабочего канала формирует движущуюся волну деформации и позволяет реализовать принцип перистальтической транспортировки в нужном направлении [10,11]. Такие насосные установки в большинстве своем не имеют недостатков, присущих традиционным объемным установкам, а точнее, их производительность зависит от особенностей источника электромагнитного поля (скорости локальной волны деформации, мощности), и исключает потери давления, обусловленные свойствами перекачиваемой среды [12]. За счет дополнительного использования рельефа внутренней поверхности рабочего канала можно структурировать поток и предотвратить расслаивание неоднородных сред.

В процессе эксплуатации насосного агрегата труба должна сохранять целостность. Для обоснования наиболее подходящего набора упруго-прочностных характеристик материала были проведены комплексные исследования: влияние компонентов состава МАЭ, влияние процентного содержания наполнителя, влияние упорядоченности его структуры, влияние внешних магнитных и температурных полей.

2. Материалы и методы

2.1. Материал эластомера

Для изготовления МАЭ в качестве матрицы используются полимеры на основе винила или каучука [13-15], а в качестве наполнителя – микроскопические магнитоактивные частицы [16, 17].

Для целей данного исследования использовался двухкомпонентный силиконовый компаунд – UNISIL 9115, который имел следующие характеристики: вязкость – 15 000 мПа·с, твердость по Шору – 15 А, эластичность – 500 %, прочность на разрыв – 3,5 МПа, сопротивление разрыву образца – 12 кН/м, линейная усадка – 1 %.

В качестве наполнителей использовались два следующих типа высокопроницаемых магнитных материалов:

- атомизированное порошкообразное железо (соответствует ГОСТ 9849-86): насыпная плотность–2,8 г/см³, основная фракция гранулометрического состава -150 мкм. Относительная магнитная проницаемость – $\mu/\mu_0 = 5,0 \times 10^3$.

- карбонильное железо R-10 (соответствует ГОСТ 13610-79): насыпная плотность 2,0 г/см³, зерновой состав основной фракции-5 мкм. Относительная магнитная проницаемость-15 μ/μ_0 .

Смесь смешивали с ферромагнитными частицами для получения МАЭ с содержанием наполнителя каждого типа 50 %, 60 % и 70 % соответственно. Далее добавляли катализатор в соотношении 100:3, после чего смесь дегазировали. Затем, в зависимости от планируемого типа эксперимента, смесь помещали в специальные формы до полной полимеризации.

Для каждого эксперимента они изготавливались индивидуально с помощью 3D-печати.

Выбор диапазона содержания наполнителя в составе образцов МАЭ основывался на результатах исследований зависимости распределения относительной (диэлектрической) проницаемости и магнитного давления (притяжения стенок трубы) (рис. 1 а, б) [18-21].

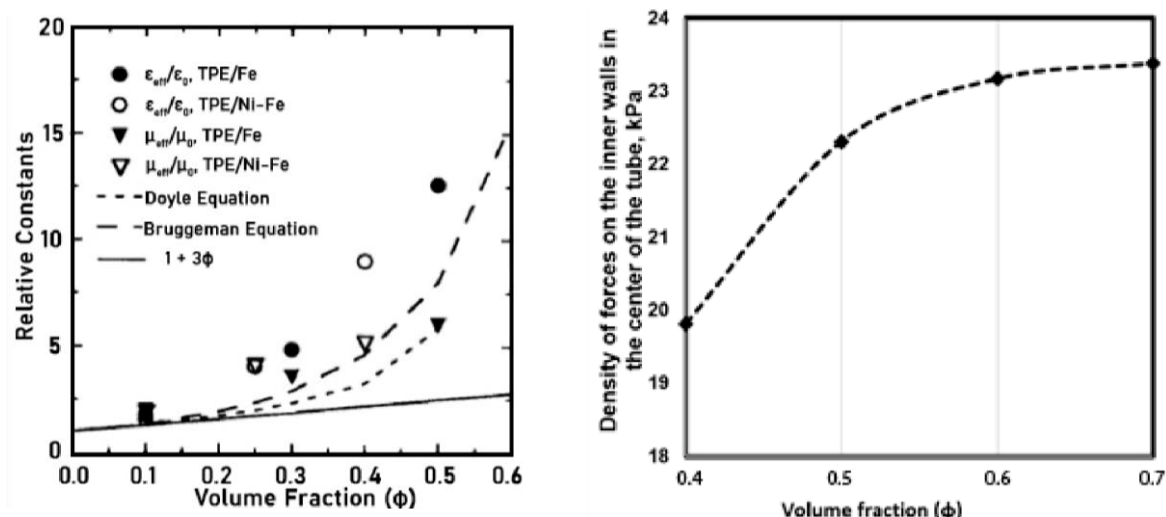


Рис. 1. Свойства МАЭ в зависимости от содержания наполнителя: (а) зависимость диэлектрической проницаемости; (б) зависимость распределения давления (магнитного притяжения) в трубке

В образцах с концентрацией выше 70 % трудно обеспечить однородное распределение частиц наполнителя на стадии полимеризации из-за быстрого осаждения частиц наполнителя. Кроме того, в таких образцах снижается прочность эластомеров на растяжение и сжатие из-за изменения прочности связи на границе раздела полимер-наполнитель с увеличением размера частиц [22,23]. При содержании частиц более 80 % структура эластомера соответствует инверсной дисперсии.

Образцы были разделены на две группы, равные по количеству образцов. Одна группа в процессе полимеризации подвергалась воздействию внешнего магнитного поля 1,2 Т в течение 12 ч. В результате были получены образцы с выраженной анизотропией структуры вдоль направления линий магнитного поля (рис. 2в,г). Вторая группа образцов не подвергалась дальнейшему воздействию в процессе полимеризации и демонстрировала изотропную структуру [24-27].

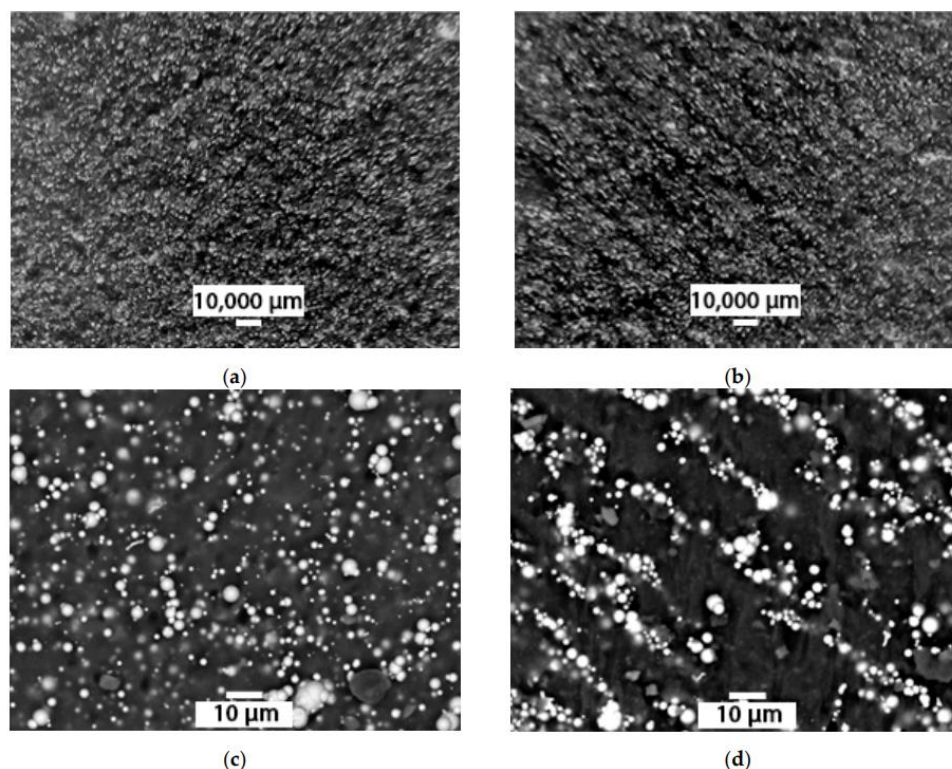


Рис. 2. Распределение частиц наполнителя в полимерной матрице МАЭ*: Атомизированный порошкообразный железный наполнитель: (а) изотропный образец, (б) анизотропный образец; наполнитель R-10 карбонильное железо: (с)-изотропный образец, (d) анизотропный образец.

* Из-за большой разницы в размерах частиц наполнителя для примера выбраны разные масштабы изображения

Для оценки качества смешивания и степени интенсивности анизотропии исследования проводились на растровом электронном микроскопе JSM-6460 (JEOL) в режиме SEI и BEI (ускоряющее напряжение – 20 кВ, ток $n \times 10^{-10}$ А) [28]. Режим COMPO оказался наиболее эффективным для решения поставленной задачи. Образцы предварительно закреплялись углеродным клеем и высушивались в течение нескольких часов под потоком воздуха с учетом свойств материала. Для обеспечения стабильной проводимости образцы были предварительно покрыты золотом.

2.2. Источник магнитного поля

Для проведения экспериментальных исследований были изготовлены образцы трех различных форм для каждого набора состава и структуры компонентов. Формы для литья были изготовлены с помощью 3D-печати.

При определении материала для изготовления трубы насосной станции необходимо учитывать множество факторов: обеспечиваемый напор насоса, допустимое давление на стенку трубы, а также допустимые зазоры при смыкании стенок [29].

В качестве источника магнитного поля использовался неодимовый магнит. Потеря магнитных свойств таких магнитов составляет не более 2-3 % за 10 лет эксплуатации (при соблюдении допустимых температурных режимов). Магнит выполнен в форме бруска размером $10 \times 10 \times 40$ мм (рис. 3). На него нанесено никелевое покрытие для защиты от негативного воздействия коррозии и ржавчины. Острые края магнитной пластины скошены. Направление магнитного поля – аксиальное. Свойства магнита приведены в таблице 1.

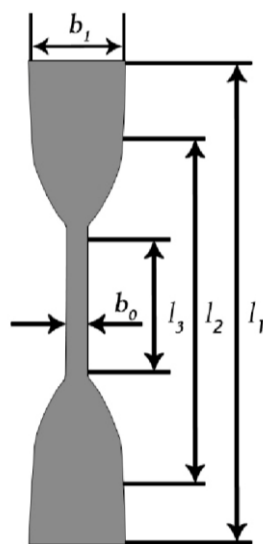


Рис. 3. Общий вид испытуемого образца. Тип III.

Таблица 1

Основные магнитные свойства магнитного бруска NdFeB

Параметр	Значение
Остаточная магнитная индукция, Вг	1.21 Т.
Коэрцитивная сила намагничивания, Нсb	>876 кА/м
Коэрцитивная сила за счет индукции, Нсj	>955 кА/м
Максимальная магнитная энергия, ВН	263-287 кДж/м ³
Диапазон рабочих температур	–60–+80°C

2.3. Исследование динамических и механических свойств МАЭ

Форма и тип образца, а также способ его изготовления зависят от состава материала, выбор производился в соответствии с ГОСТ 270-75 Резина. Метод определения упругих и растягивающих напряженно-деформированных свойств. Для данного исследования образцы были сформированы в двухсторонние лопатки с соответствующим набором размеров (рис. 3, табл. 2). Были приготовлены

пластины МАЭ толщиной $(2,0 \pm 0,2)$ мм с различной концентрацией и структурой организации материала. После периода полимеризации из них вырезали образцы с помощью матрицы.

За исключением толщины, размеры образцов определялись размерами фрез и оставлялись без контроля после вырезания. Для обеспечения равномерной установки образцов в захватах были нанесены установочные метки, расстояние между которыми составляло (40 ± 1) мм.

Таблица 2

Размеры образцов для исследования

Параметр	Значение, мм
Общая длина, l_1	75,0
Ширина широкой части, b_1	12,5
Длина узкой части, l_3	25,5
Ширина узкой части, b_0	4,0
Расстояние, определяющее радиус кривизны, l_2	50,0
Расстояние между метками, l_0	20,0
Простая толщина	2,0

Исследование свойств МАЭ, связанных с напряжением при растяжении, оценивалось по значениям прочности при растяжении, удлинению при разрыве и напряжению при заданном удлинении. Экспериментальные процедуры состояли из трех этапов (рис. 4):

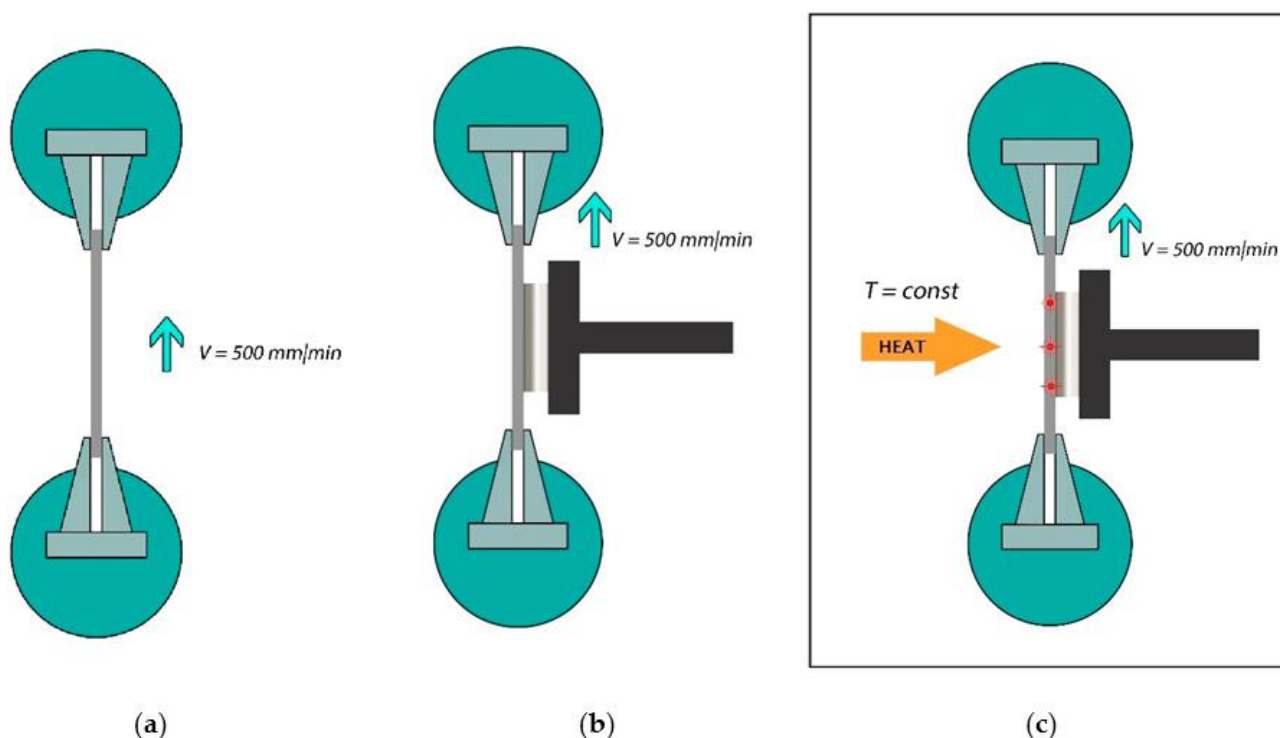


Рисунок 4. Экспериментальная схема оценки динамических и механических свойств МАЭ:
(а) исследование без внешнего воздействия; (б) исследование под воздействием внешнего магнитного поля;
(в) исследование под воздействием комбинации внешнего магнитного и температурного полей

А – тесты при температуре $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ и скорости движения активного захвата-500 мм/мин;

В – испытания при температуре $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$, приложении внешнего магнитного поля напряженностью 1,2 Т и скорости движения активного захвата 500 мм/мин;

С – испытания при температуре $(70 \pm 2)^\circ\text{C}$, приложении внешнего магнитного поля напряженностью 1,2 Т и скорости движения активного захвата 500 мм/мин.

Из-за вязкоупругого поведения эластомера свойства поверхности зависят от скорости нагружения и температуры. Различные скорости отслаивания приводят к разной прочности сцепления интерфейса между захватом и подложкой [30]. Исследования проводились при одинаковой скорости, чтобы исключить влияние этого эффекта.

Исследования при повышенной температуре проводились в специальной термокамере. Она обеспечивала требуемую температуру в рабочем объеме (ограниченном траверсами захватов машины) с допустимой погрешностью $\pm 2,0^\circ\text{C}$. Температура контролировалась в трех точках на поверхности шейки эластомера с помощью тепловизора Fluke Ti450.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Оценка адсорбционной способности материала

Для изучения влияния напряженности внешнего магнитного поля в процессе полимеризации МАЭ при различной концентрации наполнителя подготовленные образцы с содержанием наполнителя 50 %, 60 % и 70 % были исследованы методом РЭМ-анализа.

МАЭ, содержащий частицы карбонильного железа, имеет сферический наполнитель размером до 5 мкм. В образцах, подвергнутых воздействию магнитного поля, распределение этих частиц в матрице отличается от образца той же концентрации, полимеризованного без такого воздействия (рис. 5).

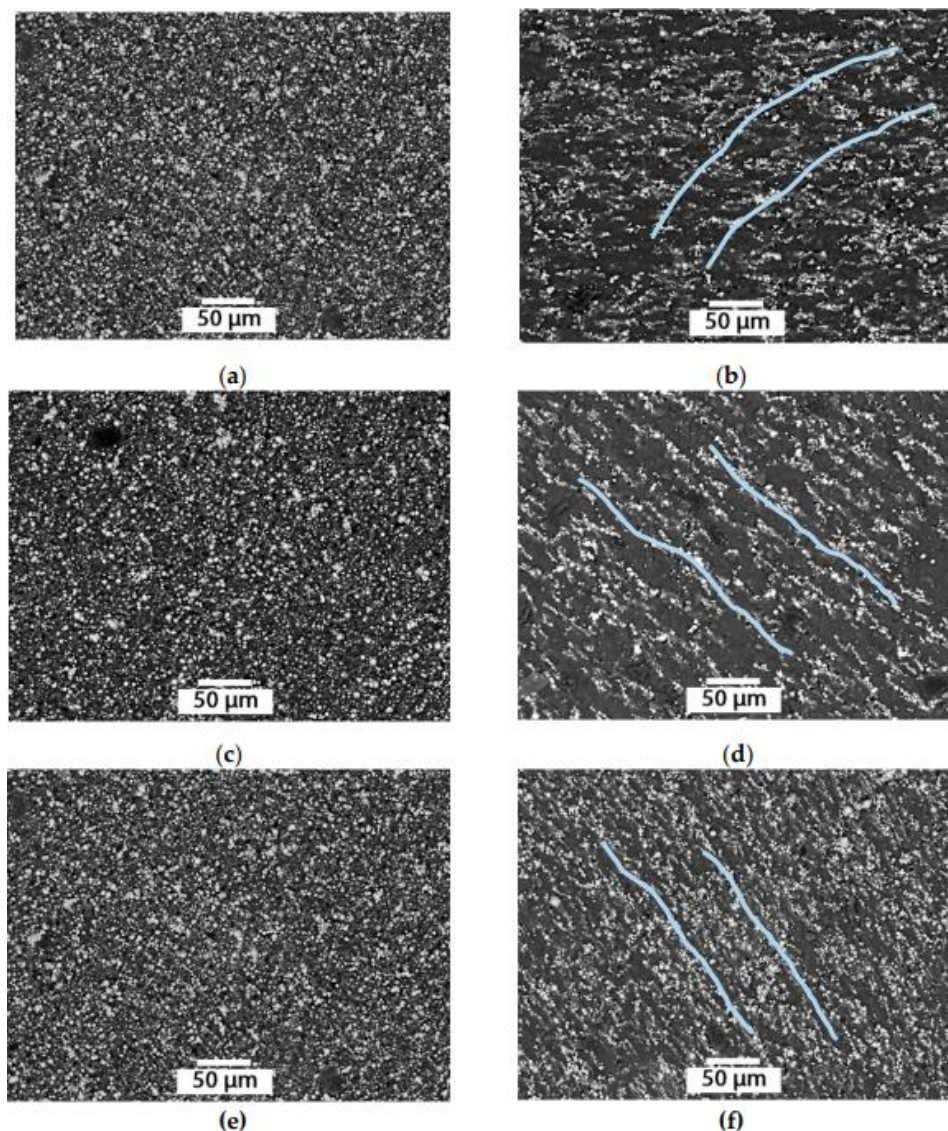


Рис. 5. Внутренняя структура образцов МАЭ: (а, с, е) изотропная структура; (b, d, f) анизотропная структура; содержание наполнителя 50 %, 60 %, 70 %

В образце (b) частицы выстроены в вытянутые агломераты параллельно линиям действия магнитного поля; расстояние между этими линиями одинаково. Образец (d) изменяет свою структуру аналогичным образом. Однако оценить анизотропное расположение частиц в этом образце сложно в областях с повышенной агломерацией частиц железа, размер которых может варьироваться от $n \times 10$ мкм до 1 мм. В образце (e) без магнитного воздействия также можно наблюдать области агломерации частиц железа размером 100-300 мкм и образование структур «сфера в сфере» размером около 10 мкм. После магнитного воздействия анизотропная структура со структурами «сфера в сфере» становится плотнее, однако в зонах агломерации она ведет себя иначе (рис. 6).

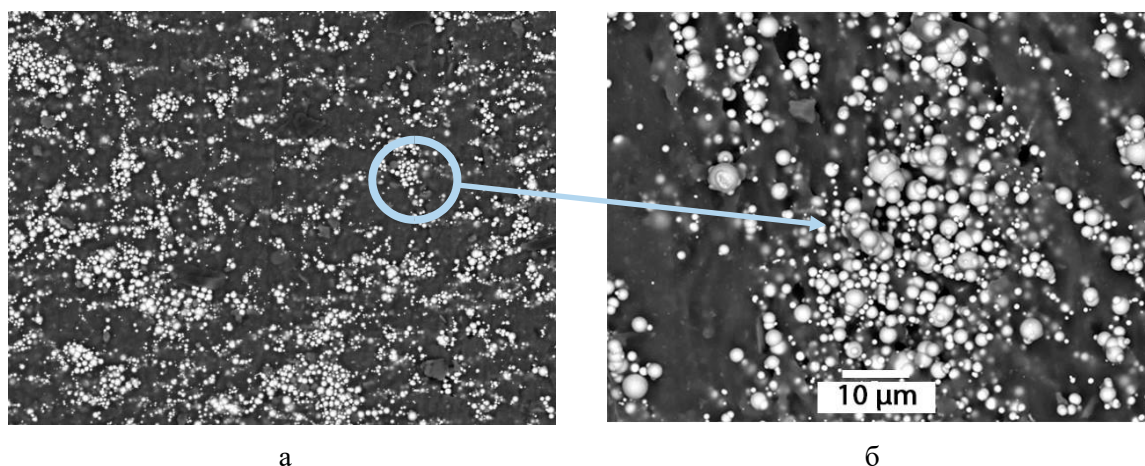


Рис. 6. Образование областей агломерации в процессе полимеризации МАЭ с наполнителем R-10 во внешнем магнитном поле, 70 %: (а) увеличение до 50 мкм; (б) увеличение до 10 мкм

Частота таких агломераций значительно возрастает с увеличением концентрации наполнителя, увеличивается и их линейный размер. При более детальном рассмотрении таких структур обнаруживается ядро произвольной формы, состоящее из крупных частиц наполнителя [31]. Кроме того, более мелкие частицы упорядоченно располагаются вокруг крупных, образуя пространственную слоистую структуру. Этот эффект можно объяснить более высоким значением эффективного магнитного поля, которое возникает как комбинация внешнего поля и самоиндуцированного поля крупных частиц наполнителя.

Увеличение способности к агломерации наряду с уменьшением размера частиц и последующим увеличением размера агломерата является результатом адсорбционной способности [32]. Чем больше склонность к агломерации, тем меньше значение предельного заполнения объема $\phi_{\max}$. Кроме того, с увеличением адсорбционной способности свойства композиционного материала изменяются более интенсивно.

В образцах МАЭ, приготовленных с использованием в качестве наполнителя распыленного порошкообразного железа, ярко выражено формирование анизотропной структуры (рис. 7).

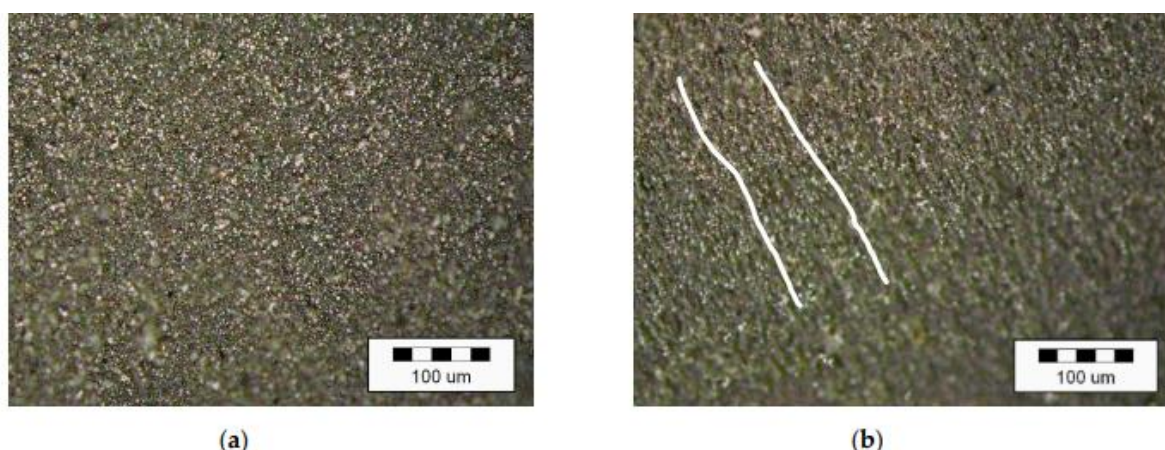


Рис. 7. Внутренняя структура образцов МАЭ с содержанием наполнителя 70 %:
(а) изотропная структура; (б) анизотропная структура

Несмотря на идентичный химический состав наполнителей R-10 и распыленного порошкообразного железа, а также несмотря на метод приготовления МАЭ, размер и масса частиц твердой фракции определяют различия в структурной организации конечного материала.

Анализ распределения наполнителя в материале матрицы проводился с помощью программы TourView. Она позволила создать трехмерное представление интенсивности изображения. Перераспределение вдоль выбранной плоскости позволило получить изображение, отражающее уровни распределения наполнителя в образце (рис. 8). На изображениях отчетливо видно образование структур «сфера в сфере». Они располагаются в столбчатых структурах, сливаясь в общий агломерат, растущий в направлении источника магнитного поля.

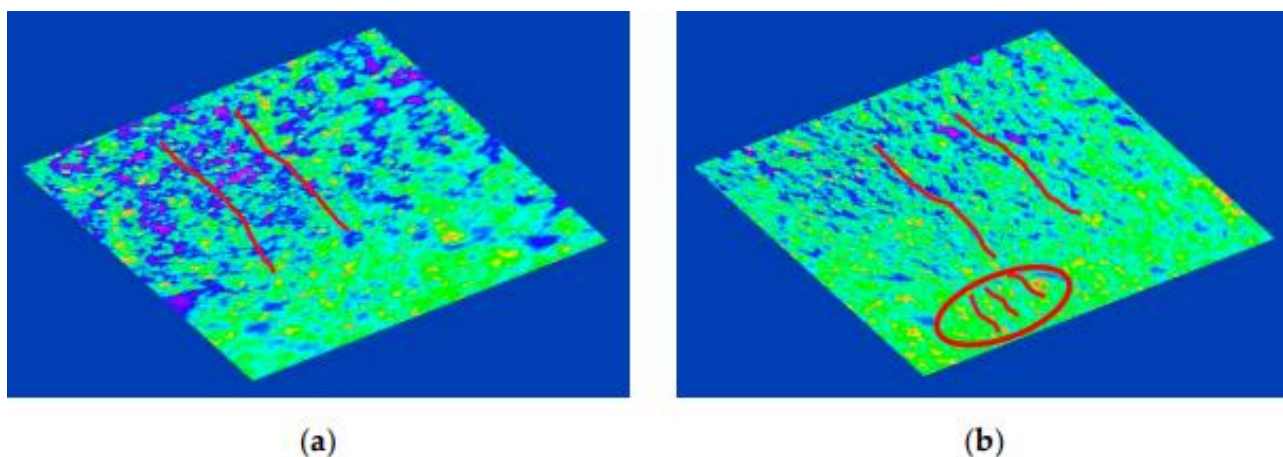


Рис. 8. Образование агломерационных областей в процессе полимеризации МАЭ с распыленным порошкообразным железным наполнителем во внешнем магнитном поле: (а) 50 %; (б) 70 %

Подобная структурная организация, безусловно, влияет на механические свойства материала, приводя к потере стабильности, когда содержание магнитного наполнителя достигает 70 % и выше (рис. 9).

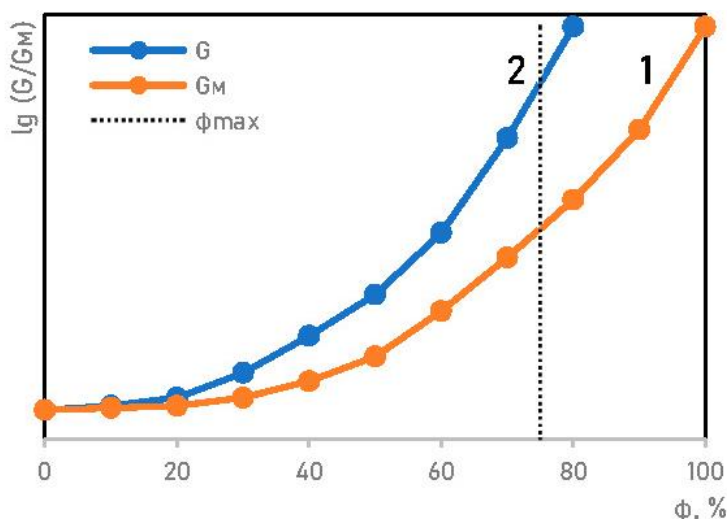


Рис. 9. Зависимость между относительным модулем упругости G/GM и содержанием наполнителя ϕ : (1) расчетная кривая без учета предельной упаковки частиц; (2) кривая с учетом предельной (плотной) упаковки частиц $\phi_{\max}$

3.2. Оценка динамических и механических свойств материала

При сравнении наполнителей следует отметить, что уменьшение размера зерен наполнителя приводит к увеличению их общей удельной поверхности, увеличению количества частиц при одинаковом объемном содержании и, как следствие, к уменьшению расстояния между частицами наполнителя в портативном магнитометре с оптической накачкой и увеличению их способности к образованию агломератов.

Последующие испытания позволили оценить влияние концентрации наполнителя и его структуры на основные показатели упруго-прочностных свойств эластомеров.

Учитывая принцип работы насосной установки, основными из них были модуль упругости, вязкость, прочность МАЭ.

Расчетным путем модуль упругости полимерной смеси можно предсказать лишь приблизительно. Наилучшее соответствие уравнения экспериментальным данным наблюдается в интервале концентраций наполнителя до 20 % и выше 80 %. Для среднего диапазона концентраций, где происходит обращение фаз, расчеты малоприменимы (рис. 9) [33].

Введение твердых недеформируемых частиц наполнителя снижает деформируемость МАЭ с увеличением содержания наполнителя, а также с увеличением размера частиц (рис. 10).

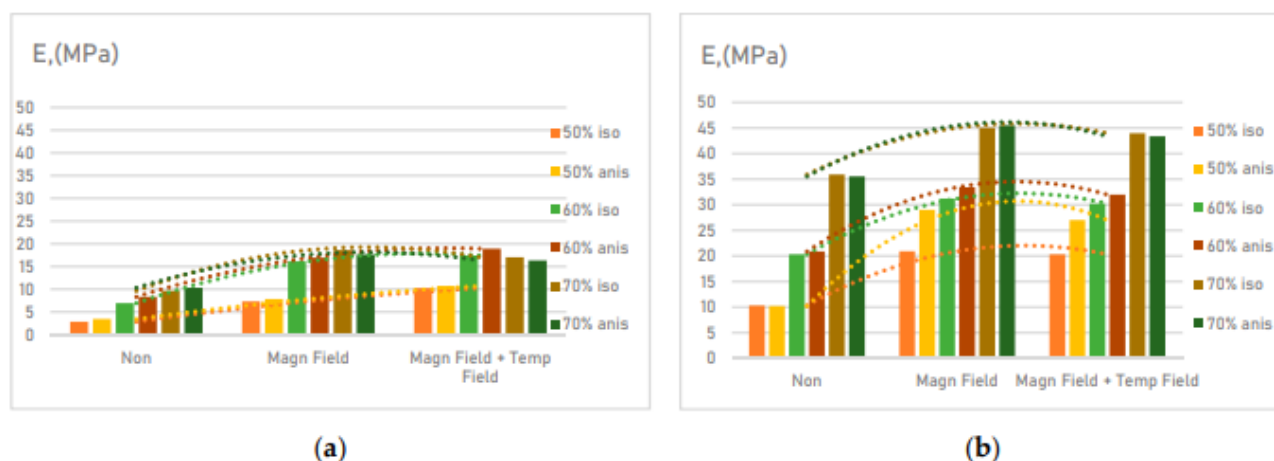


Рис. 10. Оценка характеристик МАЭ – модуля упругости:
(а) образцы с наполнителем R-10; (б) образцы с наполнителем из распыленного порошкообразного железа

Кривые развития модуля упругости эластомеров показывают, что МАЭ с наполнителем из распыленного порошкообразного железа имеет в среднем на 50 % бóльшую начальную упругость по сравнению с МАЭ с наполнителем R-10. Попарное сравнение образцов показало, что пластичность анизотропного образца практически не отличается от изотропного.

Оценка изменения вязкости материала при воздействии магнитного поля выявила стабильное увеличение этого параметра. При совместном воздействии магнитного и температурного поля вязкость материала несколько снижается за счет размягчения материала матрицы.

Величина площади контакта фаз в композитном эластомере определяется удельной поверхностью наполнителя [34]. При размере частиц менее 10 мкм наблюдается резкое уменьшение расстояния между частицами в диапазоне концентраций выше 60 %.

При воздействии на материал магнитных и температурных полей наибольший эффект усиления регистрируется при контакте межфазных слоев в материале. Это условие соблюдается при применении наполнителя с более крупной фракцией (распыленное порошкообразное железо).

Сравнивая растяжение на одинаковую длину образцов из чистого силикона и МАЭ на основе силикона, следует отметить, что матрица сама по себе (без участия твердого наполнителя) должна обеспечивать необходимую деформацию. Поэтому при увеличении содержания наполнителя матрица деформируется в большей степени, чем чистый полимер (ϕ):

$$\varepsilon_{sil} = \frac{\varepsilon_{MAE}}{1 - \phi} \quad (1)$$

где ε_{sil} – удлинение кремниевой матрицы.

Соответственно, при 50 % частиц наполнителя в составе МАЭ матрица деформируется в 4 раза при удлинении такого образца в 2 раза, а при 70 % – в 6 раз [35]. Как показали результаты экспериментов, это неизбежно приводит к разрушению МАЭ (рис. 11).

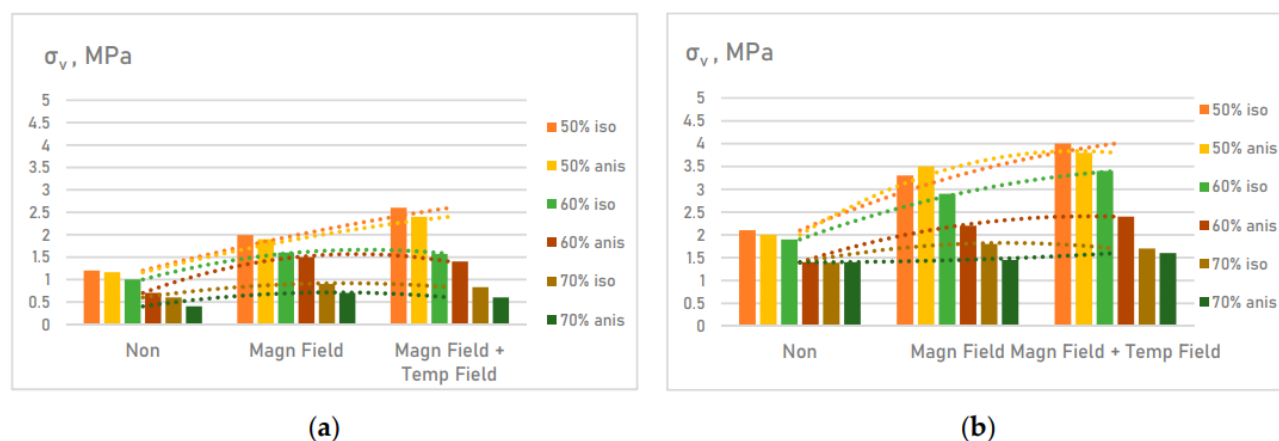


Рис. 11. Исследование динамических и механических свойств МАЭ на растяжение:
(а) образцы с наполнителем P10; (б) образцы с наполнителем из распыленного порошкообразного железа

Прочность композитного эластомера хуже коррелирует с изменением модуля упругости при увеличении содержания наполнителя. Это объясняется тем, что прочность зависит от условий распространения микродефектов при разрушении. В то время как модуль упругости является свойством, характерным для неповрежденной структуры [36]. Развитие усадочных внутренних напряжений или накопление напряжений на частицах наполнителя в процессе деформации сильно влияет на прочность и практически не влияет на модуль упругости [37].

Деформация матричного полимера в сочетании с периодическим нагружением материала, перенапряжением на границе раздела матрица-наполнитель неизбежно приведет к появлению микродефектов в МАЭ. При увеличении относительной степени наполнения до 60–70 % перенапряженные области вокруг частиц начинают перекрываться, способствуя росту пористости, и прочность материала снижается. Этот эффект объясняется снижением прочности связи на границе раздела кремний-наполнитель. Снижение прочности материала с наполнителем P10 в среднем на 38 % объясняется меньшим расстоянием между частицами.

Это явление также коррелирует с теорией Бланшара-Паркинсона, которая объясняет усиление полимерных композитов за счет упрочняющего эффекта, вызванного образованием прочных связей «силикон-наполнитель» [38]. Поскольку количество этих связей определяется размером и характером поверхности наполнителя, то частицы наполнителя с относительно большей площадью поверхности контакта обеспечивают хорошие армирующие свойства.

Оценка изменения прочности МАЭ под воздействием магнитного и температурного полей показала, что предел прочности анизотропных образцов заметно снижается по сравнению с изотропным материалом. Частицы наполнителя выстраиваются в цепочки, образуя зоны с неравномерной толщиной межфазного слоя.

4. Выводы

Проведенное комплексное исследование позволило определить параметры эластомера, пригодного для изготовления трубки перистальтического насосного агрегата. По результатам оценки упруго-прочностных свойств магнитоактивных эластомеров на основе магнитомягких наполнителей были сделаны следующие выводы:

1. Увеличение концентрации наполнителя в композиции МАЭ способствует снижению деформируемости. Этот эффект усиливается при воздействии внешнего магнитного поля и несколько ослабевает при одновременном воздействии магнитного и температурного полей. Этот эффект ослабления можно объяснить более быстрой миграцией частиц наполнителя, крючков и узлов структуры материала под воздействием повышенной температуры.

Содержание наполнителя выше 70 % приводит к снижению стабильности конечного материала и не рекомендуется к применению.

2. Анизотропная структура МАЭ приводит к повышению упругих свойств образцов, усиливающихся при воздействии внешнего магнитного поля. Она также способствует образованию

агломератов в конечном материале, что приводит к снижению прочностных характеристик. Эта тенденция экспоненциально возрастает по мере увеличения содержания наполнителя в матрице и уменьшения размера зерна материала.

3. Магнитоактивный эластомер, приготовленный с относительно большей долей наполнителя, демонстрирует более стабильные динамические и механические свойства – предел прочности образца увеличивается в среднем на 38 %, и далее растет с таким увеличением; модуль упругости в 2 раза выше (рис. 2 и 3).

4. При воздействии внешнего магнитного поля на образцы МАЭ, независимо от размера наполнителя, упругость и вязкость образцов возрастают. Этот эффект особенно значителен при низких концентрациях. При совместном воздействии магнитного и температурного полей упругость и вязкость материалов увеличивается в среднем на 30 % по сравнению с материалом без внешнего воздействия (рис. 2 и 3).

5. Проведенные исследования показывают, что МАЭ с содержанием наполнителя около 60 %, с относительно большей долей наполнителя и изотропной структурой конечного полимеризованного материала рекомендуются как наиболее подходящий материал для изготовления деталей насосного оборудования (рис. 1).

Вклад авторов: концептуализация, М.В. и Д.Н.; Методология, М.В.; Программное обеспечение, Д.Н.; валидация, М.В. и Д.Н.; формальный анализ, Д.Н.; исследование, Д.Н.; ресурсы, Г.О.; курирование данных, Г.О.; написание – подготовка первоначального варианта, М.В.; написание – рецензирование и редактирование, М.В.; визуализация, М.В.; наблюдение, М.В.; управление проектом, М.В.; получение финансирования, М.В. Все авторы прочитали и согласились с опубликованным вариантом рукописи.

Финансирование: Данное исследование было профинансировано Российским научным фондом, грант № 19-79-10151.

Заявление Совета по институциональному надзору: не применимо.

Заявление об информированном согласии: не применимо.

Заявление о доступности данных: данные, подтверждающие результаты этого исследования, можно получить по запросу у соответствующего автора. Данные не находятся в открытом доступе из-за конфиденциальности или этических ограничений.

Конфликты интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Финансирующие организации не принимали участия в разработке дизайна исследования, сборе, анализе и интерпретации данных, написании рукописи и принятии решения о публикации результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Qiu, J.D.; Lai, X.J.; Fang, W.Z.; Li, H.Q.; Zeng, X.R. An efficient strategy for simultaneously improving tracking resistance and flame retardancy of addition-cure liquid silicone rubber. *Polym. Degr. Stab.* 2017, 144, 176–186. <http://doi.org/10.1016/j.polyimdegradstab.2017.08.005>
2. Fuhrer, R.; Schumacher, C.M.; Zeltner, M.; Stark, W.J. Soft Iron/Silicon Composite Tubes for Magnetic Peristaltic Pumping: Frequency-Dependent Pressure and Volume Flow. *Adv. Funct. Mater.* 2013, 23, 3845–3849. <http://doi.org/10.1002/adfm.201203572>
3. Li, Y.P.; Zeng, X.R.; Lai, X.J.; Li, H.Q.; Fang, W.Z. Effect of the platinum catalyst content on the tracking and erosion resistance of addition-cure liquid silicone rubber. *Polym. Test.* 2017, 63, 92–100. <http://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2017.08.017>
4. Shuib, R.K.; Pickering, K.L.; Mace, B.R. Dynamic properties of magnetorheological elastomers based on iron sand and natural rubber. *J. Appl. Polym. Sci.* 2015, 132, 41506. <http://doi.org/10.1002/app.41506>
5. Nguyen, V.Q.; Ahmed, A.S.; Ramanujan, R.V. Morphing Soft Magnetic Composites. *Adv. Mater.* 2012, 24, 4041–4054. <http://doi.org/10.1002/adma.201104994>, <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22760813>
6. Bruschi, P.; Ciomei, A.; Piotta, M. Design and analysis of integrated flow sensors by means of a two-dimensional finite element model. *Sens. Actuat. A* 2008, 142, 153–159. <http://doi.org/10.1016/j.sna.2007.05.019>
7. Cvek, M.; Kutalkova, E.; Moucka, R.; Urbanek, P.; Sedlacik, M. Lightweight, transparent piezoresistive sensors conceptualized as anisotropic magnetorheological elastomers: A durability study. *Int. J. Mech. Sci.* 2020, 183, 105816. <http://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105816>
8. Lu, A.H.; Salabas, E.L.; Schüth, F. Magnetic nanoparticles: Synthesis, protection, functionalization, and application. *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* 2007, 46, 1222–1244. <http://doi.org/10.1002/anie.200602866>, <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17278160>
9. Fan, Y.; Gong, X.; Xuan, S.; Zhang, W.; Zheng, J.; Jiang, W. Interfacial friction damping properties in magnetorheological elastomers. *Smart Mater. Struct.* 2011, 20, 035007. <http://doi.org/10.1088/0964-1726/20/3/035007>
10. Grass, R.N.; Athanassiou, E.K.; Stark, W.J. Covalently functionalized cobalt nanoparticles as a platform for magnetic separations in organic synthesis. *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* 2007, 46, 4909–4912. <http://doi.org/10.1002/anie.200700613>
11. Ruan, X.H.; Xuan, S.H.; Zhao, J.; Bian, H.T.; Gong, X.L. Mechanical performance of a novel magnetorheological fluid damper based on squeeze-valve bi-mode of MRF. *Smart Mater. Struct.* 2020, 29, 055018. <http://doi.org/10.1088/1361-665X/ab7e34>
12. Verte, L.A. *Electromagnetic Transport of Liquid Metal*; Metallurgy: Moscow, Russia, 1965; pp. 26–36.

13. Hiptmair, F.; Major, Z.; Hasslacher, R.; Hild, S. Design and application of permanent magnet flux sources for mechanical testing of magnetoactive elastomers at variable field directions. *Rev. Scient. Instr.* 2015, 86, 085107. <http://doi.org/10.1063/1.4927714>
14. Pan, Z.; Sun, R.; Zhu, S.; Kang, Y.; Huang, B.; Zhu, L. The synthesis, characterization and properties of silicone adhesion promoters for addition-cure silicone rubber. *J. Adhes. Sci. Technol.* 2018, 32, 1517–1530. <http://doi.org/10.1080/01694243.2018.1428059>
15. Lu, X.; Qiao, X.; Watanabe, H.; Gong, X.; Yang, T.; Li, W.; Sun, K.; Li, M.; Yang, K.; Xie, H.; et al. Mechanical and structural investigation of isotropic and anisotropic thermoplastic magnetorheological elastomer composites based on poly(styrene-bethylene-co-butylene-b-styrene) (SEBS). *Rheol. Acta* 2011, 51, 37–50. <http://doi.org/10.1007/s00397-011-0582-x>
16. Kramarenko, E.Y.; Chertovich, A.V.; Stepanov, G.V.; Semisalova, A.S.; Makarova, L.A.; Perov, N.S.; Khokhlov, A.R. Magnetic and viscoelastic response of elastomers with hard magnetic filler. *Smart Mater. Struct.* 2015, 24, 075010. <http://doi.org/10.1088/0964-1726/24/3/035002>
17. Tian, T.; Nakano, M. Fabrication and characterisation of anisotropic magnetorheological elastomer with 45° iron particle alignment at various silicone oil concentrations. *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* 2018, 29, 151–159. <http://doi.org/10.1177/1045389X17704071>
18. Berasategi, J.; Salazar, D.; Gomez, A.; Gutierrez, J.; Sebastián, M.S.; Bou-Ali, M.; Barandiaran, J.M. Anisotropic behaviour analysis of silicone/carbonyl iron particles magnetorheological elastomers. *Rheol. Acta* 2020, 59, 469–476. <http://doi.org/10.1007/s00397-020-01218-4>
19. Andriushchenko, P.; Nefedev, K.; Stepanov, G. Calculations of magnetoactive elastomer reactions in a uniform external magnetic field. *Eur. Phys. J. B* 2014, 87, 11. <http://doi.org/10.1140/epjb/e2013-31097-1>
20. Kang, S.S.; Choi, K.; Nam, J.-D.; Choi, H.J. Magnetorheological Elastomers: Fabrication, Characteristics, and Applications. *Materials* 2020, 13, 4597. <http://doi.org/10.3390/ma13204597>, <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/33076562>
21. Vasilyeva, M.A.; Voeth, S. A multiphysics model of the heterogeneous flow in a varying cross section duct. *J. Min. Inst.* 2017, 227, 558. <http://doi.org/10.25515/pmi.2017.5.558>
22. Boczkowska, A.; Awietjan, S.F.; Pietrzko, S.; Kurzydłowski, K.J. Mechanical properties of magnetorheological elastomers under shear deformation. *Compos. Part B Eng.* 2012, 43, 636–640. <http://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.08.026>
23. Winger, J.; Schumann, M.; Kupka, A.; Odenbach, S. Influence of the particle size on the magnetorheological effect of magnetorheological elastomers. *J. Magn. Magn. Mater.* 2019, 481, 176–182. <http://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.03.027>
24. Kumar, V.; Lee, D.-J. Iron particle and anisotropic effects on mechanical properties of magneto-sensitive elastomers. *J. Magn. Magn. Mater.* 2017, 441, 105–112. <http://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.05.049>
25. Bica, I. The influence of the magnetic field on the elastic properties of anisotropic magnetorheological elastomers. *J. Ind. Eng. Chem.* 2012, 18, 1666–1669. <http://doi.org/10.1016/j.jiec.2012.03.006>
26. Lokander, M.; Stenberg, B. Improving the magnetorheological effect in isotropic magnetorheological rubber materials. *Polym. Test.* 2003, 22, 677–680. [http://doi.org/10.1016/S0142-9418\(02\)00175-7](http://doi.org/10.1016/S0142-9418(02)00175-7)
27. Yaremchuk, D.; Toshchevikov, V.; Ilnytskiy, J.; Saphiannikova, M. Magnetic energy and a shape factor of magneto-sensitive elastomer beyond the point dipole approximation. *J. Magn. Magn. Mater.* 2020, 513, 167069. <http://doi.org/10.1016/j.jmmm.2020.167069>
28. Potapov, A.I.; Kondratev, A.V. Non-destructive testing of multilayer medium by the method of velocity of elastic waves hodograph. *J. Min. Inst.* 2020, 243, 348–356. <http://doi.org/10.31897/pmi.2020.3.348>
29. Ward, P.; Liu, D.; Waldron, K.; Hasan, M. Optimal design of a magnetic adhesion for climbing robots. *Nat. Inspired Mob. Robot.* 2013, 375–382. http://doi.org/10.1142/9789814525534_0048
30. Çakmak, U.D.; Fischlschweiger, M.; Graz, I.; Major, Z. Adherence Kinetics of a PDMS Gripper with Inherent Surface Tackiness. *Polymers* 2020, 12, 2440. <http://doi.org/10.3390/polym12112440>
31. Peregudin, S.; Peregudina, E.; Kholodova, S. The influence of dissipative effects on dynamic processes in a rotating electrically conductive liquid medium. *J. Phys. Conf. Ser.* 2019, 1359, 012118. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/1359/1/012118>
32. Andronov, G.P.; Zakharova, I.B.; Filimonova, N.M.; L'vov, V.V.; Aleksandrova, T.N. Magnetic separation of eudialyte ore under pulp pulsation. *J. Min. Sci.* 2016, 52, 1190–1194. <http://doi.org/10.1134/S1062739116061735>
33. Sokolova, M.D.; Shadrinov, N.V.; Dyakonov, A.A.; Zyryanov, I.V. Application of rubber–polymer two-layer material for lining of mining equipment. *Gorn. Zhurnal* 2019, 2, 66–69. <http://doi.org/10.17580/gzh.2019.02.13>
34. Zakharova, M.; Uspenskaya, M.V.; Podshivalov, A.A. The influence of the bentonite particles content on operating properties of gelatin/starch/glycerol/bentonite biocomposite films. In Proceedings of the 17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, Albena, Bulgaria, 5–29 June 2017; Volume 17, pp. 961–966.
35. Dzhabbarov, S.N.; Pryakhin, E.I. Research regarding heat treatment influence on properties of chromic-manganese steel with quenching in polymer solution with purpose of matching drill-stem subs. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 2017, 87, 092009. <http://doi.org/10.1088/1755-1315/87/9/092009>
36. Potapov, A.I.; Makhov, V.E. Methods for Nondestructive Testing and Diagnostics of Durability of Articles Made of Polymer Composite Materials. *Russ. J. Nondestruct. Test.* 2018, 54, 151–163. <http://doi.org/10.1134/S1061830918030087>
37. Vasilyeva, M.A. Justification of the choice matrix material of the magnetoactive elastomer for working camera-channel peristaltic unit. *Mater. Sci. Forum* 2016, 870, 13–19. <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.870.13>
38. Brown, H. Crosslinking Reactions of Carboxylic Elastomers. *Rubber Chem. Technol.* 1963, 36, 931–962. <http://doi.org/10.5254/1.3539642>