

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 678.5.066:615.46

**Е. А. Цветкова, В. А. Гольдаде, И. Ю. Ухарцева,
С. В. Зотов, Ж. В. Кадолич, В. И. Сильвистрович, Е. Г. Кикинева**

ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ С МАГНИТНЫМИ НАПОЛНИТЕЛЯМИ (ОБЗОР)

Ключевые слова: магнитный материал, магнитное поле, поляризация, коллоидные системы, магнитопласты, магнитоактивные эластомеры.

Представлен краткий обзор композиционных материалов, содержащих полимеры и магнитоактивные наполнители. Рассмотрена классификация полимерных магнитных материалов по степени наполнения и областям применения, а также по методам получения и основным магнитным характеристикам. Описаны гелевые (коллоидные) полимерные системы с магнитными наполнителями, анизотропию которых в постоянном магнитном поле объясняют существованием связи между магнитным моментом взвешенной частицы и ее кристаллографической осью. Объемная проводимость определяется концентрацией носителей заряда и их подвижностью, обуславливающей электрофоретический перенос зарядов на макрорасстояния. Тем самым, очевидна взаимосвязь магнитных и электрических эффектов в исследуемых квазиэлектретных системах. Акцентируется внимание на механизмах поляризационных процессов в коллоидных полимерных системах, описана их феноменологическая модель, перечислены наиболее широко используемые виды наполнителей и полимеров (в частности эластомеров), рассмотрены основные технологические методы изготовления магнитных композиционных материалов и их свойства, перечислены наиболее известные примеры применения магнитных материалов в медицине и технике. Сравнительный анализ полимерных магнитных материалов на основе различных связующих свидетельствует о том, что при одинаковой степени наполнения магнитные свойства материалов находятся примерно на одном уровне, но материалы заметно отличаются по физико-механическим параметрам. Особенно это характерно для наноккомпозитных магнитных материалов. Поэтому выбор связующих, вида и дисперсности наполнителя, а также степени наполнения целесообразно осуществлять в зависимости от области применения материала и изделий из него.

**E. A. Tsvetkova, V. A. Goldade, I. Yu. Ukhartseva,
S. V. Zotov, Zh. V. Kadolich, V. I. Silvistrovich, E. G. Kickinyova**

POLYMERIC COMPOSITE MATERIALS WITH MAGNETIC FILLERS (REVIEW)

Key words: magnetic material, magnetic field, polarization, colloidal systems, plastic-bonded magnets, magnetoactive elastomers.

A brief overview of composite materials containing polymers and magnetoactive fillers is presented. The classification of polymer magnetic materials according to the degree of filling and fields of application, as well as according to the methods of preparation and the main magnetic characteristics is considered. Gel (colloidal) polymer systems with magnetic fillers, the anisotropy of which in a constant magnetic field is explained by the existence of a relationship between the magnetic moment of a suspended particle and its crystallographic axis, are described. Bulk conductivity is determined by the concentration of charge carriers and their mobility, which determines the electrophoretic transfer of charges over macro distances. Thus, the relationship between the magnetic and electrical effects in the quasi-electret systems under study is obvious. Attention is focused on the mechanisms of polarization processes in colloidal polymer systems, their phenomenological model is described, the most widely used types of fillers and polymers (in particular elastomers) are listed, the main technological methods of manufacturing magnetic composite materials and their properties are considered, the most famous examples of application of magnetic materials in medicine and technology are listed. Comparative analysis of polymer magnetic materials based on different binders indicates that, with the same degree of filling, the magnetic properties of materials are approximately at the same level, but the materials differ noticeably in their physical and mechanical parameters. This is especially true for nanocomposite magnetic materials. Therefore, the choice of binders, the type and dispersion of the filler, as well as the degree of filling, it is advisable to carry out depending on the field of application of the material and products from it.

Введение

Одним из объектов материаловедения являются магнитные материалы (ММ), представляющие собой источники статических магнитных полей (МП). На основе ММ созданы многочисленные изделия и устройства. Наряду с намагниченностью, важнейшим свойством ММ является наличие широкого диапазона электрической проводимости – от металлической (металлы, сплавы) до полупроводниковой (ферриты) [1-3]. По химической природе и технологической предыстории ММ разделяют на недефор-

мируемые и деформируемые сплавы, сталь, ферриты, сплавы драгоценных металлов, микропорошковые композиции (включая интерметаллиды), а также полимерные ММ [4]. Совокупность полимерных ММ включает магнитные эластомеры [5-8], магнитоэластики [9-12], феррогели [13-17], полимерные волокна и губки, модифицированные магнитными частицами и/или жидкостями [18, 19], ультратонкие многослойные магнитные плёнки, полученные методами самосборки [20, 21], и др.

Цель настоящей работы – проанализировать современный уровень знаний в области создания и применения полимерных ММ с акцентом на коллоидные системы и магнитные эластомеры.

Классификация

Количество работ, посвящённых исследованию полимерных композитных ММ, реагирующих на внешнее МП обратимым изменением формы, невелико. В работах [22, 23] дана классификация полимерных ММ по степени наполнения магнитными компонентами, важнейшим эксплуатационным свойствам и областям применения (рис. 1). В ней не учтен такой важный признак, как природа полимерного связующего, определяющая свойства и процесс переработки ММ. Классификация [24] учитывает вид полимерного связующего (рис. 2).

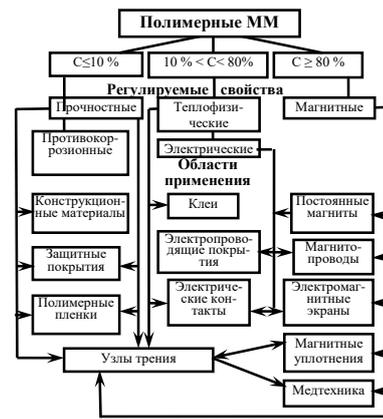


Рис. 1 – Классификация полимерных ММ по степени наполнения и областям применения

Полимерные материалы, содержащие магнитотвердые наполнители (МН)						
Связующие	Высокомолекулярные каучуки	Жидкие каучуки	Термоэластопласты	Термопласты	Реактопласты	Полимерные смеси
Основные параметры	Концентрация МН C=70-90 (масс. %)	C=70-93,3	C=70-90	C=65-85	C=70-95	C=70-95
	$\nu H_C=125-170$ (кА/м) $B_{r(max)}=0,19$ Тл	$\nu H_C=130-170$ $B_r=0,20$	$\nu H_C=125-170$ $B_r=0,19$	$\nu H_C=120-160$ $B_r=0,18$	$\nu H_C=130-190$ $B_r=0,23$	$\nu H_C=125-180$ $B_r=0,22$
Методы переработки	Вальцевание, каландрование, шприцевание, прессование, литье под давлением	Заливка в формы	Экструдирование, литье под давлением, прессование, каландрование, шприцевание	Литье под давлением, полимеризация, прессование	Заливка в формы	Литье под давлением, каландрование, вальцевание, полимеризация, прессование, экструдирование

Рис. 2 – Классификация ММ по методам получения и основным магнитным характеристикам

Гелевые (коллоидные) системы

Ряд работ [13-15] посвящен изучению свойств таких оригинальных объектов, как магнитные гели, представляющие собой дисперсные системы с жидкой дисперсионной средой, наполненной магнитными частицами с размерами около 10 нм. Подобные дисперсные системы с магнитными наполнителями отличаются специфическими свойствами, объяснение которых лежит в компетенции физики конденсированного состояния. Дисперсионная среда состоит из полимерного компонента, находящегося в состоянии геля (особого вида коллоидного раствора), в то время как магнитный наполнитель обычно представляет собой вещество, находящееся в ферро- и ферри-магнитных состояниях [8]. Анизотропию магнитных жидкостей в постоянном МП обычно объясняют существованием связи между магнитным моментом взвешенной в жидкости частицы и ее кристаллографической осью [25, 26]. Ориентация магнитных моментов частиц обуславливает их перемещение, а следовательно, и изменение электрической проводимости магнитной жидкости. Такая система представляет

собой сплошную среду, в которой распределена совокупность обладающих разной степенью свободы макро- и микроносителей электрического заряда. Её объемная проводимость определяется концентрацией носителей заряда и их подвижностью, обуславливающей электрофоретический перенос зарядов на макрорасстоянии. Исходя из изложенного, становится очевидной тесная взаимосвязь магнитных и электрических эффектов в исследуемых системах, а также актуальность изучения этой взаимосвязи на примере коллоидных полимерных ММ.

Известно [27, 28], что гелевые полимерсодержащие композиции представляют собой квазиэлектретные системы, в которых одновременно действует несколько поляризационных механизмов. Поляризация в таких системах сопровождается выстраиванием заряженных частиц вдоль силовых линий электрического поля. Введение в такие композиции магнитного наполнителя обуславливает резкое увеличение вязкости и уменьшение проводимости системы, что сказывается на поляризационных характеристиках. Для гелевых систем с комбинированным наполнителем характерна корреляция между временем релак-

саци заряда и степенью наполнения. Имеются данные [17, 29, 30], позволяющие дифференцировать магнитные наполнители по их влиянию на поляризационные характеристики гелей и свидетельствующие о возможности регулирования анизотропии физико-химических характеристик гелевых систем. При этом специфическое сочетание зарядового состояния и намагниченности может способствовать процессам введения в такие системы и регулируемого выделения из них ряда функциональных агентов (например, компонентов медицинского назначения – иммобилизованных ферментов и/или лекарственных средств).

В работах [29, 31, 32] проведено моделирование процессов поляризации-деполяризации малопротяженных дисперсных систем с магнитными наполнителями. В общем случае для поляризующейся многокомпонентной системы выделены следующие основные механизмы поляризации.

1. Механизм, связанный с переносом заряда в ионной форме, т.е. миграционный, основанный на электролитической диссоциации молекул. Хотя однополярной ионной проводимости не существует, её часто используют при моделировании феноменологической картины явления. Ионная проводимость обусловлена электролитической природой растворителя полимера. Не все молекулы органических растворителей обладают способностью ионизироваться. Тем не менее, растворители практически всегда демонстрируют именно ионную проводимость из-за присутствия электролитных загрязнителей – воды, солей, кислот и т.п. Имеет значение [33], какой электролит – сильный или слабый – преобладает в растворе. Миграционный механизм проводимости может быть обусловлен также электрофоретическим переносом твердых коллоидных частиц, окруженных двойным электрическим слоем. Такие частицы могут нести значительный поверхностный заряд. Этот механизм приводит к концентрационной поляризации, обусловленной появлением двойного слоя вблизи электродов.

2. Механизм, связанный с дипольной ориентацией твердых частиц, обладающих собственным дипольным моментом. Это – быстро спадающая компонента проводимости, обуславливающая дополнительное потребление энергии внешнего источника.

3. Механизм возникновения в электрическом поле индуцированного электрического момента у не обладающих собственным дипольным моментом коллоидных частиц.

4. Механизм междипольного взаимодействия, или структурный механизм поляризации.

Следует отметить, что адсорбционный и частично миграционный механизмы относят к диссипативным механизмам необратимого потребления энергии источника, а дипольный, квазидипольный, структурный и миграционный механизмы (в части релаксирующей составляющей больцмановского слоя) обуславливают частичную отдачу потребленной энергии за вычетом потерь на внутреннее трение в системе [34].

С учетом этих представлений предложена физическая модель поляризационных процессов в жидкодисперсных системах [31, 32, 35], построенная на примере жидкодисперсной системы – спиртового

раствора поливинилбутираля и коллоидного феррита бария. Модель деполяризации основана на релаксационных явлениях, обусловленных диффузионными процессами в поляризованных жидкодисперсных системах. При поляризации жидкодисперсной системы постоянным током установлено, что ее проводимость снижается за счет носителей заряда, которые локализуются в приэлектродных областях измерительной ячейки и перестают участвовать в переносе зарядов. Увеличение сопротивления образца при постоянном токе означает уменьшение числа носителей заряда, способных перемещаться в его объеме под влиянием внешнего электрического поля. При напряженности поля ниже критической частица феррита остается неподвижной, ток в системе обусловлен наличием всегда присутствующих ионов электролитов (диссоциированные молекулы полимера и различные примеси), и по мере накапливающегося «истощения» раствора медленно повышается его сопротивление. При достижении напряженности поля некоторого критического значения частицы наполнителя приходят в движение. Зная характеристики дисперсионной среды (вязкость раствора) и наполнителя (размер и концентрация частиц), можно для определенной жидкодисперсной системы заведомо оценить ход и основные кинетические параметры поляризации. В рамках физической модели процесса изотермической деполяризации установлено, что в жидкодисперсной системе присутствуют носители заряда разного знака, создающие в процессе поляризации различные по размеру и заряду приэлектродные заряженные области. Несмотря на ряд допущений, которые были сделаны при построении модели (пренебрежение реальным распределением зарядов, градиентом проводимости в приэлектродных областях, электрохимическими процессами на поверхности электродов, ориентационными эффектами), она позволяет предсказать вид и специфический характер кинетических зависимостей процесса поляризации-деполяризации жидкодисперсных систем.

Предложенная модель имеет феноменологический характер и может служить для понимания общих закономерностей процессов поляризации-деполяризации жидкодисперсных систем и планирования экспериментов. Она служит научным обоснованием расчетов критической концентрации структурообразования и методов повышения стабильности магнитных поляризуемых систем.

Дисперсные магнитные наполнители

Рассмотрим наполнители, благодаря которым полимерные ММ (магнитопласты) обладают магнитными свойствами. К ним относятся дисперсные ферриты бария или стронция (неметаллические оксидные ферромагнетики), редкоземельные металлы или особые металлические сплавы, включающие Cs, Co, Ni и т.д. Эти наполнители, как правило, сочетают магнитные свойства с высоким удельным электрическим сопротивлением.

Наиболее часто в качестве магнитных наполнителей используют ферриты [3, 36-39]. Большинство ферритов, нашедших практическое применение, являются поликристаллическими, т.е. состоят из

большого числа зерен. Последние представляют собой кристаллиты, чаще всего с геометрически неправильными границами. Характерная особенность кристаллитов заключается в анизотропии их свойств. Например, магнитная энергия, затрачиваемая на намагничивание ферритов, зависит от направления расположения ионов в элементной ячейке кристаллита. Кристаллиты естественно намагничены в направлении осей легкого намагничивания [4].

По характеристикам магнитных свойств ферритовые наполнители подразделяют на две группы: магнитомягкие с коэрцитивной силой $H_C = 0,8-4000$ А/м и магнитотвердые с коэрцитивной силой $H_C > 4000$ А/м. При разработке полимерных ММ используют преимущественно магнитотвердые наполнители, а также порошки из металлических сплавов. Металлические наполнители (карбонильное железо, альсифер и др.) применяют для изготовления материалов, называемых в электротехнике магнитодиэлектрическими [40]. В качестве наполнителей для электропроводящих полимерных композиций используют ферромагнитный порошок никеля [41]. Для получения сильных магнитов малого размера [40, 42-44] используют магнитотвердые материалы с большими коэрцитивной силой и магнитной энергией. Такими материалами являются платинокобальтовые сплавы и интерметаллические соединения кобальта с редкоземельными металлами: церием, самарием, празеодимом, лантаном, иттрием.

Магнитотвердые материалы, из которых изготавливают постоянные магниты, характеризуются большими значениями удельной магнитной энергии. Она тем больше, чем больше остаточная индукция B_r и коэрцитивная сила H_C материала. Постоянные магниты, изготовленные из магнитотвердых материалов, в настоящее время являются важнейшими элементами устройств, применяемых почти во всех областях техники (автоматические системы, приборостроение, электроника) [1].

Постоянные магниты во многих случаях экономически и технически выгоднее, чем электромагниты постоянного тока. В медицинской технике широко используют магнитотвердый феррит бария $BaO \cdot 6Fe_2O_3$ с гексагональной плотно упакованной кристаллической решеткой. Магнитные свойства изделий из него зависят от наличия примесей, температуры спекания, магнитной и кристаллографической текстуры, создаваемой в процессе прессования магнитов. При размерах кристаллитов, больших 10 мкм, доминирующую роль в намагничивании играет процесс смещения междоменных границ.

Платинокобальтовые сплавы с оптимальными магнитными свойствами имеют химический состав, близкий к стехиометрическому $PtCo$, или в массовых процентах – 77 % Pt и 23 % Co. Химические сплавы интерметаллических соединений редкоземельных металлов (РЗМ) с кобальтом разнообразны. Сплавы PZM_2Co_7 , $PZMCo_5$, PZM_2Co_{17} обладают наибольшей степенью магнитной кристаллической анизотропии и значительной самопроизвольной намагниченностью [42, 45].

Полимерные связующие и магнитные материалы на их основе

В качестве полимерной основы постоянных магнитов используют шесть классов материалов: высокомолекулярные каучуки, жидкие каучуки, термоэластопласты, термопласты, реактопласты и полимерные смеси. Большинство полимерных ММ обладают высокими физико-механическими характеристиками, большим удельным сопротивлением, но уступают спеченным магнитам по магнитным свойствам [46, 47].

Основным достоинством магнитотвердых эластомеров является возможность получать на их основе гибкие постоянные магниты сложной формы, повторяющей кривизну контактирующих с ними частей тела [5]. Эластомеры не хрупкие, имеют достаточно высокую прочность, легко поддаются механической обработке.

Более высокие магнитные и прочностные характеристики можно получить, используя в качестве связующего полимерные смеси [48-50]. Смешение полимеров позволяет повысить степень наполнения, сохранив пластичность и прочность на удовлетворительном уровне, снизив или увеличив проводимость или теплоемкость ММ [51-52]. В то же время именно в магнитных эластомерах магнитные и электрические свойства, присущие ферро-, ферри- и антиферромагнитным материалам кристаллической и аморфной структуры, сочетаются с эластичностью, гибкостью, ударной и механической прочностью полимеров [5]. Также к достоинствам этого класса материалов относятся высокая устойчивость к размагничивающим полям, стабильность во времени, регулируемость температурных коэффициентов остаточной магнитной индукции и магнитной проницаемости, путем соответствующего подбора порошкообразных наполнителей и полимерной основы.

В медицинской технике распространены ММ, изготовленные на основе высокомолекулярных каучуков (в частности, синтетических), содержащие 20-70 мас. % порошка феррита бария. Синтетические каучуки, получаемые полимеризацией таких мономеров, как бутадиен, стирол, изопрен, изобутилен, диорганодихлорсилоксаны и др., характеризуются высокой эластичностью и износостойкостью. В отличие от натурального каучука они более дешевы и стойки к воздействию агрессивных сред [51].

Для достижения высоких магнитных характеристик в связующее вводят максимально возможное количество магнитных наполнителей. Однако существуют предельные значения степени наполнения, выше которых материал теряет прочность, а переработка его в изделия становится проблематичной. В области предельных степеней наполнения вязкость композиции бывает столь высока, что затрудняет формирование изделий. Актуальными задачами являются снижение вязкости композиций, увеличение степени наполнения и повышение магнитных характеристик материалов за счет ориентации частиц наполнителя в МП. Для этого используют жидкие каучуки – низкомолекулярные полидиены, являю-

щаются продуктами сополимеризации диеновых углеводородов с олефинами, а также олигомеры молекулярной массы $2,5 \cdot 10^2 \div 5 \cdot 10^4$, которые получают полимеризацией диенов или сополимеризацией их с виниловыми мономерами. На основе жидкого каучука получен магнитотвердый эластомер, содержащий до 93,3 мас. % феррита стронция [53]. Преимущество высокомолекулярных каучуков над жидкими состоит в разнообразии их номенклатуры и методов переработки (каландрованием, шприцеванием, прессованием и литьем под давлением, в то время как жидкие – в основном, заливкой в формы. Однако при наполнении высокомолекулярных каучуков свыше 90 мас. % получить удовлетворительные прочностные свойства, как правило, не удается.

Совокупность ММ на основе термопластов гораздо шире: наиболее часто в качестве связующих используют полиэтилен, поливинилхлорид, полистирол и полиамид [54-58]. ММ на основе термопластичных полимеров перерабатывают на стандартном оборудовании для пластмасс: экструдерах, литьевых машинах, термопластавтоматах [59, 60]. На основе термопластов получают анизотропные магниты методом полимеризации, обладающие высокой степенью ориентации частиц, с наполнением магнетиком 96 мас. % [61]. Постоянные магниты на

основе реактопластов благодаря наличию пространственной сетчатой структуры имеют более высокие, чем термопласты, показатели модуля упругости (до 4,50 ГПа), теплостойкости (до 250-300 °С), усталостной прочности, а также более низкий коэффициент линейного расширения. ММ на основе реактопластов получают заливкой и отверждением связующего в формах [62, 63]. Недостатками ММ на основе реактопластов, как и спеченных магнитов, являются хрупкость.

ММ на основе термоэластопластов, как правило, эластичны и достаточно прочны, особенно при сочетании в связующем жестких и эластичных блоков. Перерабатываются материалы в изделия каландрованием, шприцеванием, прессованием и литьем под давлением [5, 48, 64].

Для постоянных магнитов, используемых в медицинской технике, разработан ряд нетоксичных магнитотвердых материалов на основе силиконового каучука и бутилкаучука [5]. В качестве связующего в магнитах медицинского назначения применяют также полиэтилен, полиметилметакрилат [65], поливиниловый спирт, поливинилпирролидон и др.

В настоящее время в промышленности используют четыре технологических процесса получения полимерных ММ и изделий на их основе (рис. 3).

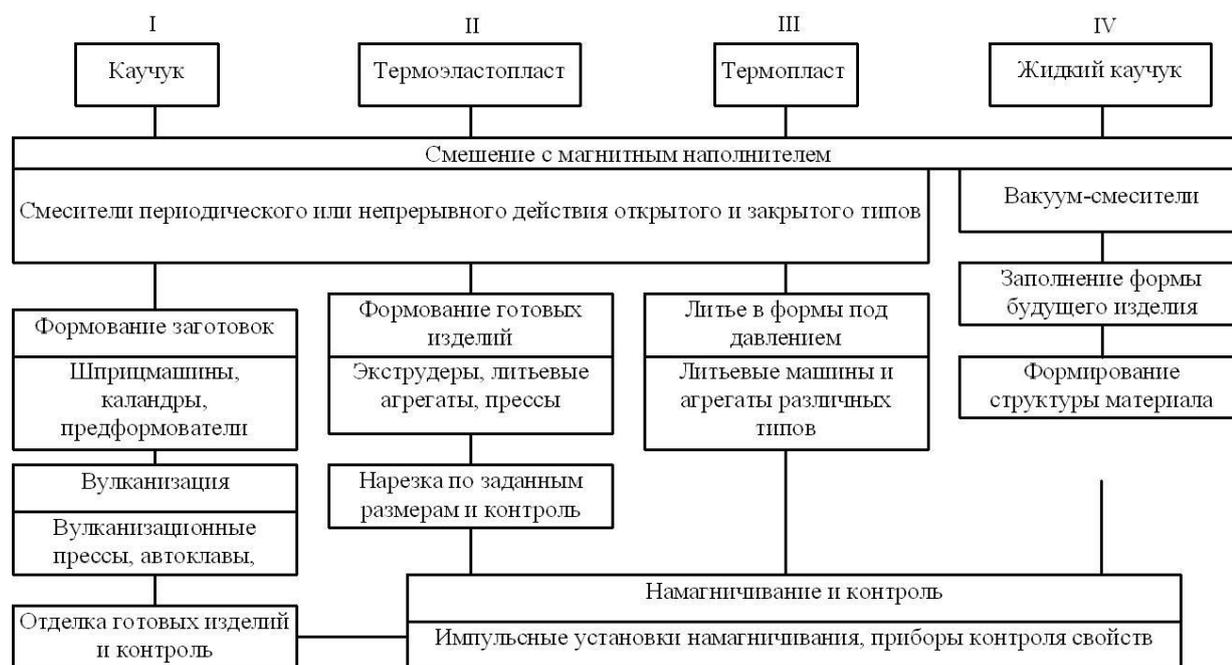


Рис. 3 – Технологические процессы получения магнитных полимерных материалов на основе каучуков (I), термоэластопластов (II), термопластов (III) и жидких каучуков (IV)

Различные варианты введения магнитных частиц в раствор полимера по-разному влияют не только на поляризуемость системы, но и на ее структуру, например:

– при наполнении полимерного раствора ненамагниченными частицами феррита бария последние хаотически располагаются в жидкой фазе (магнит-

ным взаимодействием между частицами на заметном расстоянии можно пренебречь);

– при наполнении полимерного раствора намагниченными частицами феррита бария последние ориентируются по направлению МП, однако практически не связываются в агрегаты [6], при этом проводимость системы возрастает, поскольку ори-

ентированные частицы легче перемещаются в направлении МП;

– при наполнении полимерного раствора немагнитными частицами феррита бария с последующим наложением МП в системе образуются цепочечные структуры, а двойные электрические слои в агрегированных частицах переключаются.

Магнитные наноматериалы

Магнитные наноматериалы за последнее десятилетие претерпели значительную эволюцию. Супрамолекулярная организация наночастиц достигла высокого уровня сложности, а содержащие их ММ позволили разработать новые подходы к лечению многих распространенных и опасных заболеваний, в частности, онкологических. В работе [67] представлен всесторонний обзор последних исследований в области магнитных наночастиц и их широкого применения в различных областях науки, техники и медицины. Охватываемые области применения включают доставку лекарств, тераностические агенты для лечения рака, а также катализ, преобразование биомассы и каталитическое повышение чувствительности ядерного магнитного резонанса.

Композиционные материалы, в которых частицы нанометровых размеров встроены в податливую эластомерную матрицу, известны как магнитоэологические (или магнитоактивные) эластомеры (МАЭ). Они отличаются огромным разнообразием физических свойств в МП, что обычно связывают с изменением структуры наполнителя [68]. Основные достижения в области мягких магнитоактивных эластомеров на основе силиконовых каучуков за последние двадцать лет и перспективы их дальнейшего развития представлены в работе [69]. С момента своего создания силиконовые эластомеры играли особую роль среди большого разнообразия эластомеров на основе органических каучуков. Они не могли конкурировать с органическими производными по своим физико-механическим свойствам и стоимости, но многократно превосходили конкурентов по ширине температурного диапазона, биологической инертности и биосовместимости [70]. Тем не менее, потребовалось достаточно много времени, пока не пришли новые технологии, превратившие недостатки этих материалов в преимущества. Низкий уровень межмолекулярных взаимодействий жидких каучуков позволил разработать широкое семейство герметизирующих композиций на их основе, которые открывают возможности для перехода к новым технологиям производства силиконовых эластомеров, отличающихся коротким временем отверждения и обеспечивающих использование высокопроизводительного оборудования для получения серийных изделий из силиконовых каучуков. МАЭ на основе силиконовых каучуков с внедренными магнитными частицами явились прогнозируемым и ожидаемым шагом в технологии силиконовых эластомеров.

Идея объединить свойства эластомеров со свойствами магнитных материалов не нова. Традиционные жесткие магнитополимерные композиты (маг-

нитопласты) известны давно. Как уже отмечалось, эти материалы используются в машинах, где их применение позволяет уменьшить массу постоянных магнитов для различных магнитных прокладок и защелок – устройств, обеспечивающих фиксацию того или иного подвижного соединения, сердечников постоянных магнитов. Одна из популярных областей применения магнитопластов – магнитные ленты, которые обеспечивают плотное соединение дверей в обычных бытовых холодильниках. Однако жесткие магнитные эластомеры не проявляют интеллектуальных свойств, характерных для магнитных жидкостей; они могут быть намагничены, но на их форму и механические свойства магнитные поля практически не влияют. Чтобы такой композитный материал был умным, в частности, чтобы он демонстрировал значительный магнитный отклик, полимерная матрица должна быть достаточно мягкой (с модулем упругости до нескольких десятков кПа). В мягкой матрице упругие силы сопоставимы с диполь-дипольными взаимодействиями между магнитными частицами в МП, что позволяет структурировать магнитный наполнитель вдоль силовых линий МП, как это происходит в магнитных жидкостях, в которых жидкость служит диспергирующей средой для магнитных частиц. Однако в отличие от магнитных жидкостей, в которых частицы могут свободно перемещаться, в магнитных эластомерах смещение частицы от исходного положения равновесия вызывает локальные деформации матрицы, которые затрудняют движение частицы. В результате структура, образованная наполнителем в МП, определяется балансом магнитного и упругого взаимодействий. Используя внешнее магнитное поле, можно изменить степень взаимодействия магнитных частиц в материале и, следовательно, сдвинуть этот баланс, регулируя внутреннюю структуру материала и физические свойства, которые зависят от этой структуры [69].

В России первые образцы магнитоактивных эластомеров, которые изначально назывались «магнитоупругими», были получены в результате совместных усилий ученых Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (МГУ) и Института химии и технологии элементоорганических соединений (ГНИИХТЭОС) [10]. Модуль упругости этого силиконового эластомера, содержащего магнитные частицы железа размером 11 нм и 2 мкм, увеличился в несколько раз с 16 до 100 кПа в магнитном поле 160 мТл. Параллельно с российской исследовательской группой магнитоактивные эластомеры разрабатывались в Японии и Венгрии. Однако этот материал был основан на водных полиакриламидных гелях и частицах наномангнетита [72]. Также обнаружено, что модули упругости композитов увеличиваются с ростом магнитного поля. Однако эти значения были намного ниже, чем у силиконовых матриц. Кроме того, силиконовые эластомеры были более стабильными, чем водные гели.

В последние годы во всем мире производятся МАЭ на основе различных полимеров, в частности природного [73] или бутадиенового каучука [74],

уретана [75] и др. Однако, по данным обзора [76], более 51% всех исследований проводились с силиконовыми МАЭ.

Среди наиболее интересных и ярких эффектов, проявляемых МАЭ, прежде всего следует отметить упомянутый выше магнитореологический эффект – существенное изменение вязкоупругих свойств в магнитных полях [77-79]. В частности, модуль упругости такого композита на основе мягких силиконовых матриц может увеличиваться на 1–4 порядка в относительно слабых МП – до 300 мТл [80-84], что открывает широкие возможности для создания регулируемых демпфирующих устройств, уплотнителей, жалюзи и т.д. Максимальное значение модуля упругости материала в МП в основном определяется силой трехмерной сети магнитных частиц, которая формируется в высоконаполненных композитах и демонстрирует заметную ориентацию агрегатов цепочки магнитных частиц вдоль линии поля [85, 86]. Следовательно, относительный рост модуля упругости зависит от начального модуля полимерной матрицы: чем мягче матрица в отсутствие поля, тем выше относительное увеличение ее жесткости в МП.

Области применения

Достаточно широко ММ применяются в медицине в лечебно-терапевтических целях. Так, магнитотерапия является высокоэффективным средством лечения заболеваний [87-92]. В пределах оптимальных терапевтических доз магнитного воздействия происходит интенсификация обменных процессов и репаративной регенерации травмированных тканей. МП оказывает противовоспалительное, спазмолитическое, обезболивающее, противоотечное, гипотензивное и гипокоагулирующее воздействие. По данным экспериментальных исследований и клинических наблюдений сделаны следующие выводы о физиологических пределах применения МП в лечебной практике [88]:

1) постоянные МП с индукцией $B = 3-50$ мТл при экспозиции 10–20 мин. в течение 10-20 дней улучшают результаты клинического лечения без отрицательных реакций;

2) кратковременное воздействие переменного МП с индукцией до 5 мТл и частотой 50÷60 Гц стимулирует развитие минимальных, а с индукцией 0,1÷0,5 Тл и той же частотой, $B=1÷10$ Тл и частотой 3 Гц и выше – опасных для здоровья человека биологических реакций.

Со второй половины 1990-х годов в лечебную экспериментальную и клиническую практику вошли методы использования лекарственных средств (ЛС) с магнитными наполнителями и ЛС, иммобилизованные на магнитоуправляемых микросферах-носителях. Различают четыре типа композиций ЛС с мелкодисперсными магнитомягкими частицами: препараты для ферромагнитной гипертермии злокачественных опухолей, магнитоуправляемые формы ЛС для внутреннего и наружного употребления, магнитосорбенты.

В настоящее время для нужд магнитотерапии выпускают большое количество источников МП: от простейших устройств без потребления электроэнергии до сложных аппаратов, генерирующих различные виды МП, с регулируемыми параметрами: АМИТ-01, АВИМП, «Полус-1», «Полус-3», «Сета-1», «Градиент-1», «Магнитер», «АЛМАГ», МАГ-3, «Дермоспок», «Униспок», «Гинеспок», «Проспок», «Акваспок», ПДМТ [93, 94] и многие другие. Из лечебных источников постоянных МП, которые можно использовать в домашних условиях, медицинской промышленностью выпускаются аппликаторы листовые магнитофорные (АЛМ) с индукцией на поверхности до 30–35 мТл и проникающей способностью МП в ткани – 5–7 мм. Освоен выпуск спеченных ферритовых магнитов – магнит кольцевой медицинской (МКМ-2-1), с индукцией на поверхности не менее 50 мТл, на расстояниях 15 мм – 15 ÷ 20 мТл, 50 мм – 2 мТл.

В России выпускают магнит пластинчатый двухполюсный (максимальная индукция на его поверхности – не менее 60 мТл) и магниты дисковые медицинские двухполюсные МДМ-2-1 (100 мТл) и МДМ-2-2 (130 мТл). Серийно выпускают клипсы магнитные (КМ-1) и таблетки, разработанные ПО «Магнит» (г. Новочеркасск). Они предназначены для воздействия на аурикулярные и корпоральные точки акупунктуры [95]. Магнитная клипса состоит из двух феррито-бариевых магнитов размером 5х5х3 мм, вмонтированных в пластмассовый корпус с пружинящим кольцом диаметром 30 мм. Магнитная индукция в центре 5-мм зазора между магнитами составляет 60–70 мТл. Исходная индукция магнитов сохраняется в течение 10 лет. Магнитные ферро-бариевые таблетки имеют диаметр 2–20 мм и толщину 2–5 мм. Магнитная индукция на поверхности таблетки – 35÷45 мТл [96, 97]. Пояса магнитофорные противорадикулитные представляют собой тканую ленту с карманами, в которые вставляют магнитоэластичные элементы с магнитной индукцией 30+5 мТл. Магнитный браслет представляет собой систему твердых магнитов, смонтированных в виде браслета и предназначенных для воздействия на биологически активные точки запястья руки. Для омагничивания воды выпускают большое количество аппаратов, в которых применяют постоянные магниты либо электромагниты [92].

Развивается перспективное направление *рано-заживляющих пластырей*, содержащих вещества, выделенные из сырья животного происхождения – коллагена, эластина, желатина, казеина, хитина, хитозана, кератина, мукополисахаридов. Для усиления действия таких пластырей используют постоянные магнитные поля [88].

Магнитотерапевтические добавки вводят в состав ЛС для наружного применения в виде магнитных мазей (смесь магнетита, лекарственного вещества и мазевой основы). Магнетитовые магнитные мази с метилурацином и диоксидином на вазелин-ланолиновой основе использовали при магнитной обтюрации наружных кишечных свищей и свищей зоны пищеводного анастомоза. Магнитные мази на

вазелин-ланолиновой, коллагеновой и натриевой соли – карбоксиметилцеллюлозной (Na-КМЦ) основах с мелкодисперсным магнетиком, порошками из нержавеющей стали, феррита бария используют для борьбы с хирургической инфекцией.

На базе магнетита разработаны магнитные сорбенты, которые выполняют транспортную и сорбционную функции. Они представляют собой углеродные пористые гранулы диаметром 2,5 мм.

Для поддержания физиологической циркуляции крови и восстановления кардиоваскулярных функций сердца ряд фирм выпускает вращательные насосы на постоянных магнитах, которые могут быть устроены по принципу центрифуги, использовать аксиальный (осевой) ток крови или представлять собой гибрид этих двух конструкций.

Слепоту людей с поврежденной сетчаткой пытаются предотвратить, используя магнитную жидкость, которая представляет собой устойчивую высокодисперсную гелевую систему со свойствами жидкого ферромагнетика и высокой степени лиофилизации стабилизированных частиц магнитного материала в дисперсионной среде [98]: ультрамалые частички кобальта или магнитного железняка смешиваются с жидкостью на основе силикона, которая становится магнитной и может быть управляема с помощью внешнего магнитного поля.

Магниты в последнее время все чаще используют для точного и менее инвазивного введения в организм человека различных инструментов и ЛС в ходе лечебно-диагностических процедур. Управление движением ЛС осуществляется с помощью магнитного поля. Магнитные жидкости могут найти применение в целевой лекарственной химиотерапии. Известны «магнитные курьеры» и «магнитные метки» – намагниченные частицы, к которым прикреплены биомолекулы, ЛС или диагностические агенты, действующие по тому же принципу. В последние годы магнитоуправляемые формы ЛС создают, используя магнитные микросферы с биодеградирующей оболочкой из природных клеток (эритроциты, лейкоциты, гепатоциты) и сердцевинной из лизосомов, альбуминовой, декстрановой кислот. Для лечения злокачественных опухолей созданы магнитоуправляемые формы ЛС, содержащие адриамицин, рубомицин, карномицин, сарколизин, алкеран. Их диаметр 10–12 нм, магнитное наполнение – до 50 %. После внутриартериального введения это обеспечивает целевую доставку и фиксацию сфер в опухоли или других участках организма с помощью внешнего магнитного поля [88]. Перспективным методом очистки костного мозга от раковых клеток являются специфичные магнитоуправляемые иммуносорбенты – ферромагнитные частицы диаметром не более 5 мкм, модифицированные антителиами. С помощью магнитных манипуляторов в ходе операций извлекают из тканей инструменты. Приборы с магнитными наконечниками используются для извлечения инородных металлических предметов из ран. Известен также сравнительно новый метод противораковой терапии – «магнито-жидкостная гипертермия», основанная на использовании нагретых наночастиц ферромагнитного материала.

материала.

В работе [90] приведена классификация эластичных магнитных материалов медицинского назначения, однако совокупность полимерных связующих, упомянутых в ней, недостаточно широка и не соответствует современному потенциалу материаловедения. При получении изделий медицинской техники применяют методы регулирования магнитных свойств и топографии МП в зависимости от конфигурации и назначения изделий.

Следует отметить, что, несмотря на существование различных конструкций, устройств, материалов, методик и технологий и на достигнутые успехи в их использовании, многие вопросы магнитотерапии до сих пор остаются недостаточно выясненными, а количество, качество и ассортимент выпускаемых изделий пока не соответствуют современным мировым потребностям медицины.

Заключение

Сравнение полимерных магнитных материалов на основе различных связующих свидетельствует о том, что при одинаковой степени наполнения их магнитные свойства находятся примерно на одном уровне, но материалы заметно отличаются по физико-механическим параметрам. Особенно это характерно для нанокompозитных магнитных материалов. Поэтому выбор связующих, вида и дисперсности наполнителя, а также степени наполнения целесообразно осуществлять в зависимости от области применения материала и изделий из него.

Литература

1. Мишин, Д.Д. Магнитные материалы: учебн. пособие для вузов / Д.Д. Мишин: 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. школа, 1991. – 384 с.
2. Словарь-справочник по новой керамике / Шведков Е.Л. [и др.]; отв. ред. Трефилов В.И. – Киев: Наук. думка, 1991. – 280 с.
3. Справочник по электротехническим материалам / под ред. Ю.В. Корицкого [и др.]. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – Т. 3. – 726 с.
4. Материаловедение: учебник / В.А. Струк [и др.]; под ред. Н.К. Мышкина, В.А. Гольдаде – Мн: ИВЦ Минфина, 2018. – 519 с.
5. Алексеев, А.Г. Магнитные эластомеры / А.Г. Алексеев, А.Е. Корнев. – М.: Химия, 1987. – 240 с.
6. Carlson, J.D. MR fluid, foam and elastomer devices / J.D. Carlson, M. R. Jolly // *Mechatronics*. – 2000. – Vol. 10. – P. 555.
7. Zhou, G.Y. Shear properties of a magnetorheological elastomer // *Smart Materials and Structures*. – 2003. – Vol. 12, No. 2. – P. 139–146.
8. Алексеев, А.Г. Композиционные ферропластики и электромагнитная безопасность / А.Г. Алексеев, О.М. Гусева, В.С. Семичев / – СПб.: НИИХ СПбГУ, 1998. – 296 с.
9. Magnetocontrolled elastic composite materials / E.F. Levina [et. al.] // *Russian Patent № 2157013*. – Оpubл. 2000.
10. The magnetodeformational effects and other properties of magnetoelastics / L.V. Nikitin [et al.] // *Proceedings of MISM*. – 1999. – Part 2. – P. 231.
11. The influence of crosslinkers and magnetic particle distribution along the filament backbone on the magnetic prop-

- erties of supracolloidal linear polymer-like chains / D. Mostarac [et al.] // [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://arxiv.org/pdf/1910.11607.pdf>. – Дата доступа: 06.11.2020.
12. Nikitin, L.V. Properties of magnetoelastics synthesized in external magnetic / L.V. Nikitin [et al.] // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2003. – Vol. 258–259. – P. 468–470.
 13. Гольдаде, В.А. Физика конденсированного состояния / В.А. Гольдаде, Л.С. Пинчук; под ред. Н.К. Мышкина. – Минск: Беларус. навука, 2009. – 657 с.
 14. Horkay, F. Experiments on polymer gels: Swelling and deformation of poly(vinyl acetate) networks in equilibrium with a θ -diluent / F. Horkay, M. Zrinyi // *Colloids and Surfaces*. – 1990. – Vol. 49. – P. 1–10.
 15. Магнитоэластики // [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://extxe.com/13059/magnitojelastiki>. – Дата доступа: 06.11.2020.
 16. Цветкова, Е.А. Влияние поляризации на электрофизические свойства ферритонаполненных жидкодисперсных систем / Е.А. Цветкова [и др.] // *Пластические массы*. – 2003. – №4. – С. 19–21.
 17. Гольдаде, В.А. Поляризационные процессы в магнитонаполненных гелевых системах / В.А. Гольдаде [и др.] // III Межд. конгресс «Слабые и сверхслабые поля и излучения в биологии и медицине», г. С.-Петербург, Россия, 04 июля 2003. – С. Петербург, 2003. – Т.1. – С. 56.
 18. Goldade, V. Smart materials taxonomy / V. Goldade, S. Shilko, A. Neverov // CRC Press. – 2016 – 259 p.
 19. Введение в систематику умных материалов / Л.С. Пинчук [и др.]. – Мн: Беларуская навука, 2013. – 399 с.
 20. Fendler, J.H. The colloid chemical approach to nanostructured materials / J.H. Fendler, F.C. Meldrum // *Advanced Materials*. – 1995/ – Vol. 7. – P. 607.
 21. Kotov, N.A. Layer-by-layer self-assembly of polyelectrolyte-semiconductor nanoparticle composite films / N.A. Kotov, I. Dekany, J.H. Fendler // *J. Phys. Chem.* – 1995. – Vol. 99. – P. 13065–13069.
 22. Снежков, В.В. Разработка методов термомагнитного модифицирования машиностроительных материалов на основе полимеров и ферромагнитных наполнителей: дис. ... канд. техн. наук / В.В. Снежков. – Гомель, 1988. – 151 с.
 23. Банный, В.А. Взаимодействие радиоволн СВЧ диапазона с полимерными гетерогенными системами и разработка электромагнитных экранов на основе полиэтилена: дис. ... канд. техн. наук / В.А. Банный. – Гомель, 2005. – 132 с.
 24. Цветкова, Е.А. Разработка материалов на основе полимеров для постоянных магнитов медицинской техники: дис. ... канд. техн. наук / Е.А. Цветкова. – Гомель, 1993, – 121 с.
 25. Шульман, З.П. Магнитореологический эффект / З.П. Шульман, В.И. Кордонский. – Мн: Наука и техника, 1982. – 184 с.
 26. Урьев, Н.Б. Физико-химические основы технологии дисперсных систем и материалов / Н.Б. Урьев – М.: Химия, 1988. – 256 с.
 27. Electrets / Ed. G. M. Sessler. – Berlin: Springer-Verlag, 1987. – 453 p.
 28. Ухарцева, И.Ю. Свойства ферритонаполненных систем на основе высокомолекулярных соединений. 1. Исследование электрофизических свойств ферритонаполненных гелей на основе поливинилового спирта / И.Ю. Ухарцева [и др.] // *Пластические массы*. – 2000. – № 7. – С. 5–8.
 29. Гольдаде, В.А. Феноменологическая модель процесса поляризации слабопроводящих жидкодисперсных систем / В.А. Гольдаде [и др.] // Междунар. научн.-техн. конф. «Поликом–2003», Гомель, Беларусь, 22–24 июня 2003 г. – Гомель, 2003. – С. 102–103.
 30. Ухарцева, И.Ю. Высокомолекулярные соединения для иммобилизации биологически активных веществ / И.Ю. Ухарцева, Е.А. Цветкова, Ж.В. Кадолич // *Пластические массы*. – 2010. – № 7. – С. 49–55.
 31. Goldade, V. Experimental and theoretical investigation of polarization processes in colloidal systems / V. Goldade, E. Tsvetkova. *International Scientific Journal Theoretical & Applied Science*. – 2017. – Vol. 48, Issue 4. – P. 108–117.
 32. Гольдаде, В.А. Моделирование процессов поляризации-деполяризации жидкодисперсных систем / В.А. Гольдаде, Е.А. Цветкова, И.В. Шаламов // *Проблемы физики, математики и техники*. – 2016. – № 1 (26). – С. 22–29.
 33. Фоменко, Е.Б. Приповерхностный объемный заряд и электропроводность в жидких углеводородах / Е.Б. Фоменко, Э.К. Жолковский, Ю.Ф. Дейнега // *Коллоидный журнал*. – 1986. – Т. 48, вып. 2. – С. 377–380.
 34. Бибик, Е.Е. Реология дисперсных систем / Е.Е. Бибик. – Л.: Изд. Ленингр. ун-та, 1981. – 126 с.
 35. Цветкова Е.А. Поляризационные процессы в жидкодисперсных системах / Е.А. Цветкова [и др.] // *Вестник технологического университета*. – 2016. – Т. 19, № 5. – С. 73–77.
 36. Алексеев, А.Г. Композиционные ферромагнетики и электромагнитная безопасность / А.Г. Алексеев, О.М. Гусева, В.С. Семичев. – СПб.: НИИХ СПбГУ, 1999. – 296 с.
 37. Воронежцев, В.И. Электрические и магнитные поля и технологии полимерных композиций / Ю.И. Воронежцев [и др.]; под ред. А.И. Свириденка. – Мн.: Навука і тэхніка, 1990. – 263 с.
 38. Osswald, T.A. *Material Science of Polimers for Engineers* / T.A. Osswald, G. Menges. – Munchen: Hanser, 2003. – 640.
 39. Воронежцев, Ю.И. Электрическая поляризация полимерных материалов в контакте с металлами / Ю.И. Воронежцев, В.А. Гольдаде, Л.С. Пинчук // *Весті АН БССР, сер. фіз.-тэхн. навук*. – 1985. – № 3. – С. 48–52.
 40. Богородитский, Н.П. Электротехнические материалы / Н.П. Богородитский, В.В. Пасынков, Б.М. Тареев. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 404 с.
 41. Гуль, В.Е. Электропроводящие полимерные композиции / В.Е. Гуль, Д.З. Шенфиль. – М.: Химия, 1984. – 240 с.
 42. Снежков, В.В. Полимерные композиты, содержащие ферромагнитные наполнители / В.В. Снежков // *Обзорная информация. Сер. 55.09.43. Машиностроение*. – Мн: БелНИИТИ, 1988. – 43 с.
 43. Смит, Я. Ферриты. Физические свойства и практические применения / Я. Смит, Х. Вейн // [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.nehudlit.ru/books/detail273378.html>. – Дата доступа: 06.11.2020.
 44. Hung, D.D.L. *Composite Material: Functional Material for Modern Technologies* / D.D.L. Hung. – Berlin: Springer, 2003. – 289 p.
 45. Такадзуми, С. Физика ферромагнетизма: пер. с яп. – М.: Мир, 1987. – 419 с.
 46. Безъязыкова, Т.Г. Анализ магнитных параметров эластичных магнитов / Т.Г. Безъязыкова // *Электричество*. – 1977. – № 1. – С. 81–83.
 47. Магнитные и структурные свойства металлополимеров в области 300–600 К / Г.А. Петраковский [и др.] // *Тр. ин-та физики СО АН СССР*. – 1984. – 14 с.
 48. Гидрогелевые матрицы с иммобилизованными наночастицами биоматериалов // Ю.М. Самченко [и др.] // *Материалы III Международной конференции по коллоидной химии и физической механике*, Москва, 24–28 июня 2008 г. – М.: ЛЕНАНД, 2008.–200 с.
 49. Полиолефинстирольный блоксополимер с диспергированным полисилоксаном: пат. 4552914 США. – Оpubл. 1985.
 50. Композиция блок-сополимера пропилена и этилена для наружных автомобильных деталей: пат.: 4565844 США. – Оpubл. 2004.
 51. Электропроводящие пластмассы: пат. 5344342 Японии. – Оpubл. 1991.

52. Электропроводящая полиолефиновая композиция: пат. 4169816 США. – Оpubл. 1979.
53. Мэнсон, Дж. Полимерные смеси и композиты / Дж. Мэнсон, Л. Сперлинг: пер. с англ., под ред. Ю.К. Годовского. – М.: Химия, 1979. – 439 с.
54. Магнитопласты: свойства и технология / Ю. Спичкин // [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.newchemistry.ru/printletter.php?n_id=3503. – Дата доступа: 06.11.2020.
55. Полимерный магнитный материал: пат. 2226012 РФ. – Оpubл. 2004
56. Магнитные нанокompозиты на основе сверхсшитых полистиролов / А.В. Пастухов [и др.] // XXII Российская конференция по электронной микроскопии «ЭМ-2008», Черногoловка (Россия), 02-06 июня 2008 г.: Тез. докл. – Черногoловка, 2008. – С.217.
57. Пастухов, А.В. Физико-химические свойства и структурная подвижность сверхсшитых полистиролов: автореф. дис... д-ра хим. наук / А.В.Пастухов. – Москва, 2008. – 52 с.
58. Структура и свойства магнитных композитных сорбентов на основе сверхсшитых полистиролов / А.В. Пастухов [и др.] // Журнал физической химии. – 2013. – Т. 87, № 10. – С. 1721-1727.
59. Сутягин, В.М. Общая химическая технология полимеров: учебное пособие / В.М. Сутягин, А.А. Ляпков – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2007. – 195 с.
60. Принципы создания композиционных полимерных материалов / А.А. Берлин [и др.]. – М.: Химия, 1990. – 240 с.
61. Комплексные металлоорганические катализаторы полимеризации олефинов. / Н.С. Ениколюпан [и др.] // Успехи химии. – 1986. – № 10. – С. 156-158.
62. Материаловедение и конструкционные материалы / Л.С. Пинчук [и др.] / под ред. В.А Белого. – Минск: Вышэйшая школа, 1989. – 461 с.
63. Mercier, J. Introduction to Materials Science / J. Mercier, G. Zambelli, W. Kurz. – Oxford: Elsevier, 2003. – 460 p.
64. Панов, Ю.Т. Современные методы переработки полимерных материалов. Переработка реактопластов: учеб. пособие / Ю.Т. Панов, Л.А. Чинова, Е.В. Ермолаева. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2014. – 144 с.
65. Шерстнев, П.П. Полимеры в медицинской технике / П.П. Шерстнев. – М.: Медицина, 1980. – 368 с.
66. Фридрихсберг, Д.А. Курс коллоидной химии: учебник для вузов / Д.А. Фридрихсберг. – М.: Химия, 1984. – 368 с.
67. Magnetic nanomaterial / Eds. S.H.Bossmann, H. Wang. – Royal Society of Chemistry, Cambridge. – 2017. – 266 p.
68. Andre, A. Effect of magnetic-field-induced restructuring on the elastic properties of magnetoactive elastomers / A. Andre, M. Shamonin, P. Yuskevich / Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2020. – DOI: 10.1016/j.jmmm.2020.167392.
69. Kramarenko, E.Yu. Magnetically active silicone elastomers: twenty years of development / E.Yu. Kramarenko, G.V. Stepanov, A.R. Khokhlov // INEOS OPEN – Journal of Nesmeyanov Institute of Organoelement Compounds of the Russian Academy of Sciences. – 2019. – Vol. 2 (6). – P. 178–184. – DOI: 10.32931/io1926r.
70. Марк, Дж. Каучук и резина. Наука и технология: пер. с англ.) / Дж. Марк. – Долгопрудный: ИД «Интеллект», 2011. – 768 с.
71. The magnetode formational effects and other properties of magnetoelastics / L.V. Nikitin [et al.] // Proc. Moscow International Symposium on Magnetism, Moscow, 1999. – М., 1999. – Part 2. – P. 231.
72. Magnetization-induced reduction in dynamic modulus of polyurethane elastomers loaded with ferrite/ T. Mitsumata [et al.] / J. Appl. Phys. – 1999. – Vol. 85. – P. 8451. – DOI: 10.1063/1.370626.
73. Magnetorheological elastomers: properties and applications / J.M. Ginder, [et al.] / Proc. SPIE – Smart Struct. Mater. 1999: Smart Mater. Technol. – 1999. – Vol. 3675. – P. 131–138. – DOI: 10.1117/12.352787.
74. Mitsumata, T. Magnetization-induced reduction in dynamic modulus of polyurethane elastomers loaded with ferrite / T. Mitsumata, T. Okazaki // Japan J. Appl. Phys. – 2007. – 46. – P. 4220–4224. – DOI: 10.1143/JJAP.46.4220
75. Boczkowska, A. Microstructure–property relationships of urethane magnetorheological elastomers / A. Boczkowska, S.F. Awietjan, R. Wroblewski // Smart Mater. Struct. – 2007. – 16. – 1924–1930.– DOI: 10.1088/0964-1726/16/5/049.
76. Recent Progress on Magnetorheological Solids: Materials, Fabrication, Testing, and Applications / J. Ubaidillah [et al.] // Adv. Eng. Mater. – 2015. – 17. – P. 563–597. – DOI: 10.1002/adem.201400258.
77. Shamonin, M. In: Novel Magnetic Nanostructures // M. Shamonin, E.Yu. Kramarenko. – Amsterdam, Elsevier, 2018. – P. 221–245. – DOI: 10.1016/B978-0-12-813594-5.00007-2.
78. Odenbach, S. Microstructure and rheology of magnetic hybrid materials / S. Odenbach // Arch. Appl. Mech. –2016.– 86. – P. 269–279. – DOI: 10.1007/s00419-015-1092-6.
79. Mechanics of magnetopolymer composites: A Review / M.T. Lopez-Lopez [et al.] // J. Nanofluids. – 2016. – 5. – P. 479–495. – DOI: 10.1166/jon.2016.1233.
80. Effect of a homogeneous magnetic field on the mechanical behavior of soft magnetic elastomers under compression / S.S. Abramchuk [et al.] // Polym. Sci., Ser. A – 2006. – 48. – P. 138–145. – DOI: 10.1134/S0965545X06020064.
81. Effect of a homogeneous magnetic field on the viscoelastic behavior of magnetic elastomers / G.V. Stepanov [et al.]. – Polymer. – 2007. – 48. – P. 488–495. – DOI: 10.1016/j.polymer.2006.11.044.
82. Novel highly elastic magnetic materials for dampers and seals: part II. Material behavior in a magnetic field / S.S. Abramchuk [et al.] // Polym. Adv. Technol. – 2007. – 18. – P. 513–518. – DOI: 10.1002/pat.923.
83. Evaluation of highly compliant magneto-active elastomers with colossal magnetorheological response / A. Stoll [et al.] // J. Appl. Polym. Sci. – 2014. – 131. – P. 39793. – DOI: 10.1002/app.39793.
84. New composite elastomers with giant magnetic response. A.V. Chertovich [et al.] // Macromol. Mater. Eng. –2010/– 295. – P. 336–341. – DOI: 10.1002/mame.200900301.
85. An, H.-N. Direct observation of particle rearrangement during cyclic stress hardening of magnetorheological gels / H.-N. An, S.J. Picken, E. Mendes // Soft Matter. – 2012. – 8. – P. 11995–12001. – DOI: 10.1039/C2SM26587G.
86. Novel highly elastic magnetic materials for dampers and seals: Part I. Preparation and characterization of the elastic materials / Abramchuk S. [et al.] // Polym. Adv. Technol. – 2007. – 18. – P. 883–890. DOI: 10.1002/pat.924.
87. Pugachov, V. Multipolar elastic permanent magnets for magnetotherapy / V. Pugachov, S. Orlova, Dz. Vavere // Latvian J. of Physics and Technical Sciences. – 2009. – No. 1. – P. 56-64.
88. Демецкий, А.М. Медицинская магнитология и нанотехнологии / А.М. Демецкий [и др.]. – СПб: АССПИН, 2004 – 239 с.
89. Демецкий, А.М. Искусственные магнитные поля в медицине / А.М. Демецкий, А.Г. Алексеев – Мн: Беларусь, 1981. – 94 с.
90. Демецкий, А.М. Учебное пособие по применению магнитной энергии в практике здравоохранения / А.М. Демецкий, А.В. Цецохо – Мн: ВОДНМИ, 1990. – 74 с.
91. Улащик, В.С. Молекулярные аспекты действия лечебных физических факторов (введение в проблему) / В.С. Улащик // Медицинские новости.– 2003. – № 1. – С. 30-38.

92. Улащик, В.С. Популярная физиотерапия / В.С. Улащик. – Мн: Беларусь, 2003.–283 с.
93. Каталог продукции «Спок». – 2007. – С. 1-25.
94. Улащик, В.С. Общая физиотерапия: учебник / В.С. Улащик, И.В. Лукомский. – Мн.: Книжный дом, 2004. – 512 с.
95. Алексеев, А.Г. Новые источники постоянных магнитных полей для медицины / А.Г. Алексеев // Механизмы лечебного действия магнитных полей; под. ред. Демецкого А.М. – Ростов-на-Дону: РОДНМИ, 1987. – С. 9–18.
96. Магнитотерапия. Эффективность магнитных полей в медицине, биологии, сельском хозяйстве и индустрии / В.С. Патрасенко // [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.it-med.ru/library/m/magnet.htm>. – Дата доступа: 06.11. 2020.
97. Тишина, Е. Магниты и современная медицина. / Е. Тишина // Advanced magnetic technologies & consulting (ACT & C). – С. 1-11 // [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.ndfeb.ru/articles/magter.htm>. – Дата доступа: 06.11. 2020.
98. Фертман, В.Е. Магнитные жидкости / В.Е. Фертман // Справочное пособие. – Минск: Выш. школа, 1988. – 184 с.

© **Е. А. Цветкова**, доцент, кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела № 1 Государственного научного учреждения «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси (г. Гомель, Республика Беларусь). E-mail: tsvetkova@tut.by; **В. А. Гольдаде**, профессор, доктор технических наук, профессор кафедры радиофизики и электроники Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины (г. Гомель, Республика Беларусь). E-mail: victor.goldade@gmail.com; **И. Ю. Ухарцева**, доцент, кандидат технических наук (г. Гомель, Беларусь). E-mail: ukhartseva@yandex.ru; **С. В. Зотов**, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник отдела № 1 Государственного научного учреждения «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси (г. Гомель, Республика Беларусь). E-mail: zotov-1969@mail.ru; **Ж. В. Кадолнич**, доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры коммерции и логистики Учреждения образования «Белорусский торгово-экономический университет потребительской кооперации» (г. Гомель, Беларусь). E-mail: cilodak@mail.ru; **В. И. Сильвистрович**, аспирант, ассистент кафедры хирургических болезней с курсом сердечно-сосудистой хирургии Учреждения образования «Гомельский государственный медицинский университет» (г. Гомель, Республика Беларусь). E-mail: surgery_1@gsmu.by; **Е. Г. Кикинева**, доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры коммерции и логистики, Учреждения образования «Белорусский торгово-экономический университет потребительской кооперации» (г. Гомель, Беларусь). E-mail: ekickinyoval@mail.ru.

© **E. A. Tsvetkova**, assistant professor, Ph. D. (Tech.), senior researcher, Dep. N 1, The State Scientific Institution “V.A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of National Academy of Sciences of Belarus” (Gomel, Belarus). E-mail: tsvetkova@tut.by; **V. A. Goldade**, professor, Dr. Sci. (Tech.), professor of Chair of radio-physics and electronics, Francisk Skorina Gomel State University (Gomel, Belarus). E-mail: victor.goldade@gmail.com; **I. Yu. Ukhartseva**, assistant professor, Ph. D. (Tech.), (Gomel, Belarus). E-mail: ukhartseva@yandex.ru; **S. V. Zotov**, Ph. D. (Tech.), leading researcher, Dep. N 1, The State Scientific Institution “V.A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of National Academy of Sciences of Belarus” (Gomel, Belarus). Gomel, Belarus). E-mail: zotov-1969@mail.ru; **Zh. V. Kadolich**, assistant professor, Ph. D. (Tech.), assistant professor of Chair of commerce and logistics, Belarusian Trade and Economics University of Consumer Cooperatives (Gomel, Belarus). E-mail: cilodak@mail.ru; **V. I. Silvistrovich**, graduate student, assistant of the Department of surgical diseases with a course in cardiovascular surgery, Gomel State Medical University (Gomel, Belarus). E-mail: surgery_1@gsmu.by; **E. G. Kickinyova**, assistant professor, Ph. D. (Tech.), assistant professor of Chair of commerce and logistics, Belarusian Trade and Economics University of Consumer Cooperatives (Gomel, Belarus). E-mail: ekickinyoval@mail.ru.