

УДК 537.636,532.5

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МАГНИТОАКТИВНЫХ ЭЛАСТОМЕРОВ С МАГНИТНО-ТВЕРДЫМИ КОМПОЗИТНЫМИ ПЛОМБАМИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ МАГНИТНОГО ФИКСАТОРА СЕТЧАТКИ ГЛАЗА

© 2019 г. Ю. А. Алехина^{1, *}, Л. А. Макарова¹, Т. А. Наджарьян¹,
Н. С. Перов¹, Г. В. Степанов^{1, 2}, Е. Ю. Крамаренко¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”, Москва, Россия

²Акционерное общество “Государственный ордена Трудового Красного Знамени
научно-исследовательский институт химии и технологии элементоорганических соединений”, Москва, Россия

*E-mail: ya.alekhina@physics.msu.ru

Поступила в редакцию 07.09.2018 г.

После доработки 31.01.2019 г.

Принята к публикации 27.03.2019 г.

В работе исследованы силы взаимодействия образцов магнитоактивного эластомера (МАЭ) с пломбами, изготовленными из магнитнотвердого композитного материала на основе порошка неодим–железо–бор. Силы взаимодействия МАЭ-ленты с внешней пломбой, содержащей 90% магнитнотвердых частиц, сравнимы по величине с силами, возникающими при взаимодействии этих же лент с системами однонаправленных постоянных магнитов. Композитный материал позволяет изготовить пломбу произвольной формы, что может обеспечить значительное преимущество для дальнейшего хирургического использования в качестве элемента фиксатора сетчатки глаза.

DOI: 10.1134/S0367676519070044

Интерес в области исследования многофункциональных композитов обусловлен “умными” свойствами таких материалов, а также широкой областью их практического применения. Одним из ярких примеров таких материалов являются магнитоактивные эластомеры (МАЭ), представляющие собой упругую полимерную матрицу с распределенными ферромагнитными микро- или наноразмерными частицами. Магнитоактивные эластомеры не только демонстрируют свойственный ферромагнетикам отклик на магнитное поле и закономерности упругого поведения полимера, но также проявляют ряд особенных свойств, возникающих в результате взаимодействия наполняющих частиц и матрицы, – магнитореологический эффект и эффект памяти формы, магнитодеформационный эффект и т.д. [1–4]. При этом большинство этих эффектов в композитном эластомере возникает из-за изменения взаимодействия ферромагнитных частиц друг с другом под действием внешнего магнитного поля и последующего их перераспределения в матрице. Быстрый выраженный отклик МАЭ на магнитное поле позволяет использовать их в самых разнообразных областях, в частности, в качестве материала для эле-

ментов амортизирующих устройств, а также в биомедицинских устройствах и сенсорах [5–7].

Ранее [8, 9] была предложена конструкция фиксатора сетчатки глаза с использованием МАЭ в качестве материала внутренней пломбы. Внешняя пломба представляла собой силиконовую ленту с закрепленными в ней постоянными магнитами из сплава неодим–железо–бор. Магнито-статическое взаимодействие внешней и внутренней пломб обеспечивает фиксацию сетчатки на глазном дне (рис. 1). Измерения сил взаимодействия постоянных магнитов и внутренних пломб из МАЭ подтвердили, что предлагаемая конфигурация фиксатора обеспечивает приемлемое для дальнейшего хирургического использования давление.

Тем не менее для совершенствования предлагаемой конструкции фиксатора актуальным остается вопрос о создании внешней магнитной пломбы произвольной формы. С этой целью были исследованы магнитнотвердые пломбы на основе частиц сплава неодим–железо–бор и силиконовой связующей компоненты. Используемые материалы содержали различные доли ферромаг-

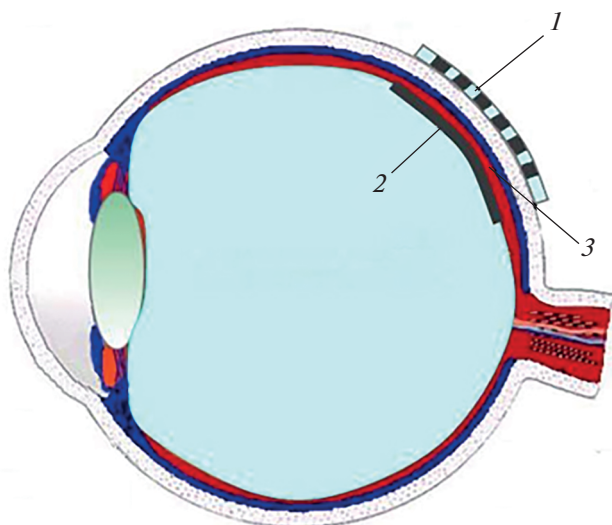


Рис. 1. Схематическое изображение фиксатора сетчатки глаза: 1 – внешняя пломба, 2 – внутренняя МАЭ лента, 3 – сетчатка глаза.

нитных частиц. В материале первого типа содержались частицы сплава неодим–железо–бор и карбонильного железа в соотношении 5 : 1 в общей массовой концентрации 80%. Магнитно-твердый наполнитель в этом случае определяет величину магнитного сигнала пломбы, а магнитомягкий наполнитель вводится для увеличения общей магнитной восприимчивости композита и стабилизации магнитнотвердого наполнителя в объеме матрицы. Материал второго типа содержал частицы сплава неодим–железо–бор в концентрации порядка 90 мас. %. Используемые частицы сплава неодим–железо–бор имели неправильную форму и размеры 0–100 мкм. Частицы были обработаны раствором петролейного эфира с 0.5% силикона. Частицы карбонильного железа имели сферическую форму и средний размер 4.5 мкм. Их поверхность также была обработана силиконом. Модификация поверхности частиц позволяет избежать их прямого контакта с живыми тканями. Более того, конечная магнитнотвердая пломба также может быть покрыта слоем медицинского силикона, что обеспечит биосовместимость элементов фиксатора сетчатки. Магнитные свойства магнитно-твердых композитов представлены на рис. 2. Из материалов обоих типов были вырезаны пломбы с поверхностью 4×8 мм и намагничены в поле постоянного магнита 16 кЭ.

В качестве внутренней пломбы использовались образцы магнитоактивных эластомеров с площадью 4×8 мм и толщиной 0.1 мм, содержащие 52, 62, 70 и 76 мас. % частиц карбонильного железа. Технология изготовления материалов описана в работе [8].

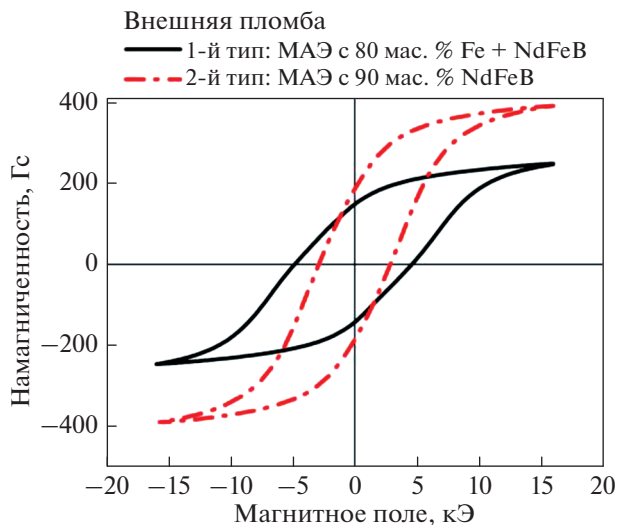


Рис. 2. Петли гистерезиса магнитно-твердых материалов различных типов.

Силы взаимодействия между пломбами были измерены с помощью установки, собранной на основе электронных весов [8]. Измерения проводились при расположении внутренней пломбы над центром магнитной внешней пломбы.

Численное моделирование взаимодействия образцов МАЭ с магнитными пломбами было выполнено при помощи метода конечных элементов в ПО Comsol Multiphysics. Для расчетной области решали уравнения Максвелла с магнитной пломбой в качестве источника поля. Распределение и характеристики намагниченности пломбы с порошком неодим–железо–бор были получены в результате непосредственных симуляций процесса намагничивания тела с геометрическими и магнитными параметрами, соответствующими реальным. Зависимость магнитных свойств МАЭ от приложенного поля задавалась моделью Ланжевена с параметрами, определяемыми из петель гистерезиса для образца заданной концентрации. Более подробно процесс моделирования описан в [8, 9].

Увеличение намагниченности, возникающее в результате увеличения концентрации железного порошка в МАЭ, приводит к усилению взаимодействия рассматриваемых пломб (табл. 1). Стоит также отметить, что силы взаимодействия МАЭ ленты с магнитно-твердыми пломбами из материала второго типа с большей концентрацией частиц неодим–железо–бор (90%) в 2–4 раза больше, чем для магнитно-твердых пломб из материала первого типа (наполнение 80 мас. % Fe + NdFeB). Величины создаваемых давлений для этих пломб близки к тем, что были получены ранее для систем однона-

Таблица 1. Давление, создаваемое взаимодействующими МАЭ-лентами с различными концентрациями частиц железа и внешними пломбами на основе МАЭ с порошком неодим–железо–бор; расстояние между поверхностями составляло 0.7 мм

Концентрация частиц железа в МАЭ ленте	Эксперимент Пломба 1-го типа Давление, Па	Моделирование пломбы 1-го типа Давление, Па	Эксперимент Пломба 2-го типа Давление, Па
76%	91 ± 9	89.56	316 ± 31
70%	59 ± 6	69.00	223 ± 22
62%	44 ± 4	52.22	154 ± 15
52%	34 ± 3	38.78	127 ± 13

правленных постоянных магнитов [8]. Результаты моделирования имеют близкие к экспериментальным данным значения давления и с учетом статистической погрешности измерений хорошо описывают наблюдаемую зависимость (табл. 1).

Таким образом, использование композитных материалов на основе магнитно-твердого порошка неодим–железо–бор может служить альтернативой коммерчески доступным постоянным магнитам в качестве материала для элемента фиксатора сетчатки глаза, поскольку композитные материалы обеспечивают возможность синтеза образцов произвольной формы, привязанной к конкретным размерам глазного яблока, на котором проводится хирургическое вмешательство.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 16-15-00208).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Carlson J.D., Jolly M.R. // *Mechatronics*. 2000. V. 10. № 4–5. P. 555.
2. Abramchuk S., Kramarenko E., Stepanov G. et al. // *Polym. Adv. Techn.* 2007. V. 18. № 11. P. 883.
3. Guan X., Dong X., Ou J. // *JMMM*. 2008. V. 320. № 3–4. P. 158.
4. Nikitin L.V., Stepanov G.V., Mironova L.S., Gorbunov A.I. // *JMMM*. 2004. V. 272–276. P. 2072.
5. Yang J., Sun S.S., Du H. et al. // *Smart Mater. Struct.* 2014. V. 23. № 10. Art. № 105023.
6. Sun Sh., Deng H., Yang J. et al. // *Smart Mater. Struct.* 2015. V. 24. № 4. Art. № 045045.
7. Li J., Li W., Du H. // *Smart Mater. Struct.* 2014. V. 23. № 12. Art. № 123001.
8. Makarova L.A., Nadzharyan T.A., Alekhina Yu.A. et al. // *Smart Mater. Struct.* 2017. V. 26. № 9. Art. № 095054.
9. Nadzharyan T.A., Makarova L.A., Kazimirova E.G. et al. // *J. Phys. Conf. Ser.* 2018. V. 994. Art. № 012002.