

МОДИФИКАЦИЯ СВОЙСТВ И СТРУКТУРЫ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ МАГНИТОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКЕ

¹Степович М.А., ^{2*}Шипко М.Н., ^{3*}Коровушкин В.В., ^{3**}Савченко Е.С.,
^{2**}Тихонов А.И., ^{2***}Корнев И.А.

¹Калужский государственный университет им. К.Э. Циолковского,
Калуга, Россия, e-mail: m.stepovich@rambler.ru

²Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина,
Иваново, Россия, e-mail: *michael-1946@mail.ru, **aitispu@mail.ru,
***kornevispu@gmail.com

³Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
Москва, Россия: e-mail: *krvsch@mail.ru, **savchenkoelena@ya.ru

Ранее [1,2] показано, что импульсные электромагнитные воздействия могут приводить к существенным изменениям в структуре и свойствах твёрдых тел. В настоящей работе изложены некоторые результаты использования магнитоимпульсной обработки (МИО) для модификация свойств и структуры ферромагнитных материалов. Методами рентгеноспектрального микроанализа, мёссбауэровской спектроскопии, магнитометрии исследованы структура и магнитные свойства ферромагнитных материалов после их МИО. Объектами исследования служили упорядочивающиеся сплавы Fe-Si-Al (сендаст), магнетит Fe₃O₄, ферриты с гексагональной структурой (BaFe₁₂O₁₉ и SrFe₁₂O₁₉), монокристаллические плёнки Y₃Fe₅O₁₂, аморфные сплавы Fe-Si-B, Al-Fe-Ni, полиморфные модификации оксидов железа. МИО осуществляли в импульсном магнитном поле напряжённостью 10-30 кА/м с длительностью импульсов 0,1-0,2 с и интервалом между импульсами 1-2 с. Часть из полученных результатов экспериментальных исследований со ссылками на ранее опубликованные работы приведена в [3, 4], а результаты последних исследований – в работах [5-11]. В целом полученные результаты указывают на заметные изменения параметров мёссбауэровских спектров и физико-химических свойств исследованных ферромагнитных материалов. Такие изменения связаны с упорядочением атомов точечных и линейных дефектов, имеющих в ферромагнитных материалах. Наиболее отчётливо эти процессы прослеживаются для сплава Fe-Si-Al (сендаст) и магнетита, для которых наблюдается повышение порядка в расположении атомов Si и Al в объёмно-центрированной решётке сплава и ионов Fe³⁺ и Fe²⁺ в шпинельной структуре магнетита. Различная степень упорядочения катионов и вакансий способствует формированию модификации Fe₃O₄, свойственной низкотемпературному состоянию. Изменение структурных состояний материалов сопровождается повышением намагниченности насыщения, остаточной индукции, уменьшением коэрцитивной силы, что весьма важно для практического применения при производстве устройств нового поколения. В качестве примера результатов наших последних исследований в таблице приведены данные исследования магнитных характеристик образцов аморфной электро-технической стали до (0 импульсов) и после её МИО. Наиболее отчётливо влияние МИО прослеживается на значениях удельной намагниченности насыщения σ_s , коэффициента прямоугольности σ_r/σ_s и площади петли магнитного гистерезиса. Максимальное увеличение удельной намагниченности σ_s (на 30%), остаточной намагниченности σ_r (на 58%) наблюдается после воздействия 20 импульсами. После МИО регистрируются и наиболее высокие значения коэффициента прямоугольности петли магнитного гистерезиса, при этом её площадь и коэрцитивная сила практически не изменяются. Учитывая, что коэффициент прямоугольности петли магнитного гистерезиса может увеличиться за счёт изменения ориентации векторов спонтанной намагниченности микрообъёмов аморфного материала, можно предположить возможность изменения анизотропии фольги при её МИО. Такое предположение отвечает росту величины коэрцитивной силы H_c , вклад в которую вносит магнитоупругая анизотропия и анизотропия упорядоченных пар. Такие изменения могут быть связаны с изменением ближнего порядка в расположении магнитоактивных атомов, что отвечает результатам мёссбауэровских исследований образцов, выполненных при температурах 300K и 87K.

Таблица – Результаты исследования магнитных характеристик образцов аморфной электротехнической стали до (0 импульсов) и после её магнитоимпульсной обработки

Число импульсов	Удельная намагниченность насыщения σ_s , А×м ² /кг	Остаточная намагниченность σ_r , А×м ² /кг	Коэрцитивная сила H_c , кА/м	Площадь петли, А×м ² /кг	Отношение остаточной намагниченности к намагниченности насыщения σ_r/σ_s
0	130	10,60	2,3	1,3	0,079
10	134	10,62	2,3	1,3	0,079
20	168	16,77	2,5	1,3	0,1
30	154	11,02	2,8	1,7	0,072
50	140	12,76	2,3	2,2	0,091

По данным мёссбауэровской спектроскопии, наблюдаемая трансформация магнитных свойств сплавов связана с перестройкой их кристаллической структуры и появлением модификаций с более высоким уровнем магнитных свойств. Иницирующее влияние магнитного поля на такую перестройку обеспечивается понижением внутренних напряжений, изменением характера косвенного обменного взаимодействия, что способствует повышению намагниченности и уменьшению их коэрцитивной силы. Упорядочение атомов и формирование новых конфигураций ближнего порядка при МИО отчётливо прослеживается при исследовании аморфных сплавов Fe-Al-Ni, Fe-B-Si, ферритов-гранатов, физико-химические свойства которых могут достигать большого разнообразия, в результате изменения их ближнего порядка после МИО. В результате для аморфных сплавов после их МИО наблюдается появление дополнительных компонент мёссбауэровских спектров от атомов Fe, связанных с упорядочением сплава и изменением состояния магнитоактивных атомов. Это отчётливо проявляется на изменении вида и параметров петель магнитного гистерезиса после их МИО. Их изменения убедительно указывает на повышение уровня наведённой анизотропии, обусловленной упорядочением магнитно-активных атомов в процессе обработки. В свою очередь процесс перераспределения ионов Fe^{3+} между октаэдрическими узлами с различным искажением лигандного окружения в структуре феррита-граната и преимущественная локализация катионных вакансий в октаэдрах, для которых направление локального магнитного поля совпадает с направлением оси градиента электрического поля (ГЭП), способствует повышению намагниченности этих материалов. По данным мёссбауэровской спектроскопии, процесс магнитного упорядочения оказывает влияние на фоновый спектр и, как следствие, на упругие параметры и физико-механические свойства магнитных материалов.

Полученные данные указывают, что причиной изменения физико-химических свойств и структурного состояния магнитных материалов при их МИО является воздействие магнитного поля на их спиновую систему. В результате ускоряются процессы перестройки структуры, обусловленные снятием спиновых запретов и понижением барьеров для движения линейных и точечных дефектов.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований и правительства Ивановской области (проект № 18-43-370012) и гранта РФФИ и правительства Калужской области (проект № 18-42-400001).

Список литературы:

1. Альшиц В.И., Даринская Е.В., Колдаева М.В., Петржик Е.А. Магнитопластический эффект: основные свойства и физические механизмы // Кристаллография. – 2003. – Т. 48, № 5. – С. 826-854.
2. Альшиц В.И., Даринская Е.В., Колдаева М.В. Электростимуляция магнитопластичности и магнитоупрочнения в кристаллах // Письма в ЖЭТФ. – 2008. – № 7. – С. 500-507.
3. Шипко М.Н., Коровушкин В.В., Костишин В.Г., Староверов Б.А., Степович М.А. О некоторых результатах использования магнитоимпульсной обработки материалов для улучшения их магнитных характеристик // Материалы и структуры современной электроники: Сборник научных трудов VII международной научной конференции, посвящённой 50-летию кафедры физики полупроводников и наноэлектроники (12-13 октября 2016 г., г. Минск, Белорусский государственный университет) / Редкол.: В.Б. Оджаев (отв. ред.) [и др.]. – Минск: БГУ, 2016. – С. 310-313. <http://elib.bsu.by/handle/123456789/165781>
4. Шипко М.Н., Коровушкин В.В., Степович М.А., Костишин В.Г. Экспериментальные исследования влияния слабых импульсных магнитных полей на свойства конденсированных сред // Перспективные материалы и технологии: Материалы международного симпозиума (22-26 мая 2017 г., г. Витебск, Институт технической акустики НАН Беларуси, Витебский государственный технологический университет). – В 2-х ч. – Ч. 1 / Под ред. В.В. Рубаника. – Витебск: УО «ВГТУ», 2017. – С. 118-120.
5. Степович М.А., Шипко М.Н., Коровушкин В.В., Костишин В.Г. О влиянии импульсов магнитного поля на структуру и свойства магнетита // Известия РАН. Серия физическая. – 2017. – Т. 81, № 8. – С. 1152-1156.
6. Stepovich M.A., Shipko M.N., Korovushkin V.V., Kostishin V.G. Effect of Magnetic Field Pulses on the Structure and Properties of Magnetite // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2017. – Vol. 81, no. 8. – P. 1037-1040.
7. Вирюс А.А., Каминская Т.П., Степович М.А., Коровушкин В.В., Шипко М.Н., Тихонов А.И., Попов В.В. Исследование локальных характеристик аморфной электротехнической стали // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2017. – № 10. – С. 52-55.
8. Virus A.A., Kaminskaya T.P., Stepovich M.A., Korovushkin V.V., Shipko M.N., Tikhonov A.I., and Popov V.V. Investigation of the Local Characteristics of Amorphous Electrical Steel // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2017. – Vol. 11, Issue 5. – P. 1046-1049.
9. Вирюс А.А., Шипко М.Н., Степович М.А., Коровушкин В.В. Комплексный микроанализ состава и структуры порошков гематита // Прикладная физика. – 2018. – № 1. – С. 63-68.
10. Шипко М.Н., Коровушкин В.В., Костишин В.Г., Исаев И.М., Степович М.А., Савченко Е.С. Влияние магнитоимпульсной обработки на структуру и магнитные свойства ферритов // Известия РАН. Серия физическая. – 2018. – Т. 82, № 2. – С. 232-236.
11. Shipko M.N., Korovushkin V.V., Kostishin V.G., Isaev I.M., Stepovich M.A., and Savchenko E.S. Effect of Magnetic Pulse Processing on the Structure and Magnetic Properties of Ferrites // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2018. – Vol. 82, no. 2. – P. 203-207.