

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ СЛАБЫХ ИМПУЛЬСНЫХ
МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА СВОЙСТВА КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД**

^{1,2}Шипко М.Н., ³Коровушкин В.В., ^{2,4}Степович М.А., ³Костишин В.Г.

*Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина,
г. Иваново, Россия, E-mail: michael-1946@mail.ru*

*²Ивановский государственный университет, г. Иваново, Россия,
E-mail: michael-1946@mail.ru, m.stepovich@rambler.ru*

*³Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
г. Москва, Россия, E-mail: krvsch@mail.ru, drvgkostishyn@mail.ru*

*⁴Калужский государственный университет им. К.Э. Циолковского,
г. Калуга, Россия, E-mail: m.stepovich@rambler.ru*

Повышение эксплуатационных параметров материалов является весьма важной технологической задачей. Эта задача может быть решена различными методами. Наиболее известными и широко используемыми в промышленном производстве являются следующие классические методы: упрочнение легированием, упрочнение пластическим деформированием, упрочнение термическими методами, в т.ч. поверхностная закалка, обработка лазером и электроискровое легирование, некоторые другие (цементация или азотирование стали, нитроцементация и т.п.) [1-3], плазменная обработка (см., например, [4-8]). Однако возможно использование и иных, в настоящее время ещё не нашедших широкого применения, но весьма перспективных и экономичных методов повышения эксплуатационных характеристик материалов, основанных на использовании электромагнитных излучений [9, 10], сравнительно просто реализуемых [11] и не требующих использования дорогостоящего оборудования [11-13]. В развитии такого подхода в настоящей работе проведён анализ имеющихся литературных данных по влиянию электромагнитных полей на прочностные свойства металлов, особенностей технологии поверхностного упрочнения сталей и сплавов, в т.ч. возможностей снижения склонности к хрупкому разрушению материалов в результате магнитоимпульсной обработки (МИО) [11-18]. Наиболее результативными методами исследования влияния электромагнитных полей на локальные характеристики металлов и сплавов оказались порометрия, атомная силовая и, в меньшей степени, растровая электронная микроскопия и рентгеноспектральный микроанализ [14-18], однако наиболее интересные результаты были получены нами при использовании ядерной гамма-резонансной спектроскопии [19], которая позволяет получить уникальную информацию об объекте исследования – см., например, [6-8, 12-19]. На основе анализа имеющихся литературных данных и результатов собственных исследований сделан вывод о том, что слабое ($10 \dots 100 \text{ кА/м}$) низкочастотное ($10 \dots 20 \text{ Гц}$) импульсное (интервал 1 с, длительность импульса 0,1 с, число импульсов $20 \dots 50$) магнитное поле, изменяя спиновое состояние частиц, может ускорить процессы реконструкции решетки, изменить энергетическое состояние дефектов и, как следствие, вызвать изменение физико-химических параметров материала, в т.ч. повышение износостойкости конструкционных легированных сталей после их обработки ориентировочно в 1,2...2 раза. В то же время, имеющиеся в литературе сведения и полученные авторами работы результаты указывают на возможность заметных изменений физико-механических свойств под влиянием слабых электромагнитных полей для широкого класса материалов: металлов, других кристаллических объектов, например, ферритов [20-22], и даже полимерных материалов и жидкостей. Однако механизмы влияния таких полей на состояние дефектов, мезоструктуру и, как следствие, на прочностные свойства твёрдых тел, заметно отличаются в зависимости от их природы. В частности, одной из причин влияния электромагнитного поля на пластичность ферро- или сегнетоматериалов является взаимодействие линейных дефектов с доменными стенками, однако при этом игнорируются возможности влияния полей на энергию кулоновского взаимодействия между дефектами и атомами, на спиновую систему электронов материала. Вместе с тем, перспективы использования электрических и магнитных полей в технологии наноматериалов стимулируют изучение механизмов действия полей на конденсированное вещество с учетом квантовых эффектов.

Некоторые новые результаты экспериментальных исследований влияния МИО на магнитные параметры аморфной электротехнической стали представлены в таблице 1. Наблюдающийся эффект может быть объяснён уменьшением дефектности в структуре аморфной стали, что приводит к более совершенной её структуре.

Таблица 1 – Результаты экспериментальных исследований влияния МИО на магнитные параметры аморфной электротехнической стали

Образец стали	Удельная намагниченность насыщения σ_s , Ам ² /кг	Удельная остаточная намагниченность σ_r , Ам ² /кг	Коэрцитивная сила H_c , кА/м	Магнитная энергия P , кЭ.emu/г	Коэффициент прямоугольности и петли магнитного гистерезиса M_r/M_s
Исходный	61,10	6,84	2,0	6,3	0,112
После МИО	61,79	7,58	2,2	3,4	0,123

Список литературы:

1. Обработка и упрочнение поверхностей при изготовлении и восстановлении деталей / В.И. Бородавко, В.С. Ивашко, С.А. Клименко, М.Л. Хецефц; под общ ред. М.Л. Хецефца, С.А. Клименко. – Минск: Беларус. навука, 2013. – 463 с.
2. Технология машиностроения: учебн. для вузов: в 2 т. / В.М. Бурцев, А.С. Васильев, И.Н. Гемба и др.; под ред. А.М. Дальского, А.И. Кондакова. – Том 1. Основы технологии машиностроения. – 3-е изд., испр. и перераб. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 478 с.
3. Горобей Н.Н., Лукьяненко А.С. Упрочнение поверхностного слоя металлических образцов легированием // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы 4-й международной научно-практической конференции. – СПб.: СПбГПУ, 2014. – С. 1119-1128.
4. Воробьев В.Ф., Помельникова А.С., Шипко М.Н., Степович М.А. Исследование влияния коронного и тлеющего разрядов на прочностные и химические свойства сталей // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2011. – № 12. – С. 88-92.
5. Vorobyov V.F., Pomel'nikova A.S., Shipko M.N., Stepovich M.A. Using Corona and Glow Discharges for Improving Strength Properties and Corrosion Resistance of Steel // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2011. – Vol. 5, no. 6. – P. 1208-1211.
6. Шипко М.Н., Костишин В.Г., Степович М.А., Коровушкин В.В. Модификация свойств ферритовых материалов с гексагональной структурой при обработке в плазме коронного разряда // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2017. – № 1. – С. 89-93.
7. Степович М.А., Шипко М.Н., Костишин В.Г., Коровушкин В.В. Влияние коронного разряда на характеристики супердисперсных частиц магнетита // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2017. – № 2. – С. 32-35.
8. Stepovich M.A., Shipko M.N., Kostishin V.G., Korovushkin V.V. Influence of Corona Discharge on the Characteristics of Superdispersed Magnetite Particles // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2017. – Vol. 11, no. 1. – P. 194-196.
9. Альшиц В.И., Даринская Е.В., Колдаева М.В., Петржик Е.А. Магнитопластический эффект: основные свойства и физический механизм // Кристаллография. – 2003. – Т. 48, № 5. – С. 826-854.
10. Шипко М.Н., Помельникова А.С., Шипко Г.А. Физико-химические особенности технологий поверхностного упрочнения сталей и сплавов. – Иваново: ИГЭУ, 2008. – 144 с.
11. Староверов Б.А., Степович М.А., Шипко М.Н. Автоматизация процессов импульсной магнитной обработки металлов и прецизионных сплавов // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2011. – № 8. – С. 1-4.

12. Шипко М.Н., Степович М.А., Полетаев В.А., Костюк В.Х. О влиянии слабых импульсных магнитных полей на процессы упорядочения в прецизионных сплавах системы Fe-Si-Al // Вестник ИГЭУ. – 2011. – Вып. 5. – С. 49-51.

13. Шипко М.Н., Степович М.А., Староверов Б.А., Костюк В.Х. Влияние слабых низкочастотных импульсных магнитных полей на физико-механические свойства металлов и прецизионных сплавов // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2012. – № 1. – С. 2-6.

14. Заблоцкий А.В., Вирюс А.А., Каминская Т.П., Коровушкин В.В., Кузин А.Ю., Степович М.А., Тодуа П.А., Филиппов М.Н., Шипко М.Н. Локальные характеристики прецизионных сплавов Fe₃(SiAl) после магнитно-импульсной обработки // Нано- и микросистемная техника. – 2013. – № 7. – С. 2-5.

15. Вирюс А.А., Каминская Т.П., Шипко М.Н., Степович М.А. Локальный анализ состава и структуры прецизионных сплавов системы Fe-Si-Al, подвергнутых магнитно-импульсной обработке // Физика и химия обработки материалов. – 2013. – № 2. – С. 71-75.

16. Каминская Т.П., Коровушкин В.В., Попов В.В., Шипко М.Н., Степович М.А. Атомная силовая микроскопия сплавов Fe₃(SiAl), подвергнутых магнитоимпульсной обработке // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2014. – № 12. – С. 26-30.

17. Kaminskaya T.P., Korovushkin V.V., Popov V.V., Shipko M.N., Stepovich M.A. Atomic-Force Microscopy of Fe₃(SiAl) Alloys under Magnetic-Pulse Treatment // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2014. – Vol. 8, no. 6. – P. 1235-1239.

18. 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., Белоруссия, г. Минск, Белорусский государственный университет) / редкол.: В.Б. Оджаев (отв. ред.). – Минск: БГУ, 2016. – С. 310-313. <http://elib.bsu.by/handle/123456789/165781>.

19. Степович М.А., Шипко М.Н., Коровушкин В.В., Игошин И.П. Использование эффекта Мёссбауэра для изучения влияния слабого импульсного магнитного поля на кристаллическую структуру сплавов Fe₃(SiAl) // Научный поиск. – 2013. – № 4 (10). – С. 63-65.

20. Коровушкин В.В., Костишин В.Г., Степович М.А., Шипко М.Н. Влияние магнитоимпульсной обработки на магнитные характеристики иттриевых ферритов-гранатов // Известия РАН. Серия физическая. – 2016. – Т. 80, № 12. – С. 1643-1648.

21. Shipko M.N., Kostishyn V.G., Korovushkin V.V., Isaev I.M., Stepovich M.A., Tikhonov A.I., Savchenko E.S. Magnetic properties and local parameters of crystal structure for BaFe₁₂O₁₉ and SrFe₁₂O₁₉ hexagonal ferrites // Journal of Nano- and Electronic Physics. – 2016. – Vol. 8, no. 3 – P. 03004(4pp).

22. Korovushkin V.V., Kostishyn V.G., Stepovich M.A., Shipko M.N. Effect of Magnetic Pulse Treatment on the Magnetic Characteristics of Yttrium–Iron Garnets // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2016. – Vol. 80, no. 12. – Pp. 1450-1454.