

УДК 537.632/.636:53.098

ВЛИЯНИЕ МАГНИТОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ НА СОСТОЯНИЕ ПОВЕРХНОСТИ, ЭМИССИОННЫЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА АМОРФНЫХ МАГНИТНЫХ СПЛАВОВ

© 2021 г. М. Н. Шипко^{1, *}, М. А. Степович², А. Л. Сибирев¹, А. И. Тихонов¹,
Е. С. Савченко³, Т. П. Каминская⁴

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина”, Иваново, Россия

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Калужский государственный университет имени К.Э. Циолковского”, Калуга, Россия

³Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
“Национальный исследовательский технологический университет “МИСиС”, Москва, Россия

⁴Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”, Москва, Россия

*E-mail: michael-1946@mail.ru

Поступила в редакцию 21.06.2021 г.

После доработки 05.07.2021 г.

Принята к публикации 28.07.2021 г.

Изучено влияние слабого импульсного магнитного поля на состояние поверхности, эмиссионные и магнитные свойства аморфных магнитных сплавов Fe(SiBNb). Установлено, что с ростом напряженности электрического поля возможно инициирование взрывной электронной эмиссии, которая обусловлена наличием на поверхности наноразмерных участков оксидов с более высоким удельным сопротивлением.

DOI: 10.31857/S0367676521110351

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к исследованию влияния импульсных электромагнитных полей на конденсированные среды вызван тем, что их воздействие сказывается на эволюции структурных неоднородностей и, как следствие, влияет на физико-химические свойства твердых тел [1]. Особый интерес вызывает воздействие импульсов магнитного поля на свойства аморфных ленточных магнитных материалов [2, 3]. Выполненные ранее исследования указывают на возможность изменения ближнего порядка, а также состояния поверхности при обработке таких материалов слабыми магнитными импульсами [3, 4]. Для изучения таких изменений высокую эффективность имеют методы эмиссионной и сканирующей туннельной микроскопии, автоэлектронной эмиссии, обеспечивающие регистрацию изменения микрогеометрии поверхности аморфных сплавов, а также особенностей ближнего порядка [5, 6]. Весьма информативным является и сопоставление результатов таких исследований с данными измерений магнитных свойств изучаемых материалов до и после магнитоимпульсной обработки (МИО). Изучение особенностей влияния МИО на магнитные и эмиссионные свойства

“ленточных” аморфных сплавов состава Fe(SiBNb) и является целью настоящей работы.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектами для исследования служили нелегированные (сплав 1) и легированные никелем (сплав 2) аморфные сплавы состава $Fe_{73.5}(SiBNb)_{26.5}$. Образцы представляли собой ленту толщиной около 100 мкм, шириной 10 мм, длиной 50 мм, которые были получены методом сверхбыстро охлаждения расплава на вращающемся барабане. Для их МИО использовали импульсы магнитного поля амплитудой $(5-8) \cdot 10^3 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$ длительностью 0.1–0.5 с и интервалом между импульсами 1–2 с. Количество импульсов составляло 10–50.

Исследование параметров автоэлектронной эмиссии сплавов осуществляли в камере газоразрядной визуализации (ГРВ) [7]. Для обработки ГРВ-изображений использовали программу GDV-Scientific Laboratory, которая позволяет определить параметры разряда, поддающиеся количественным оценкам, а также визуализацию параметров локальных неоднородностей на поверхно-

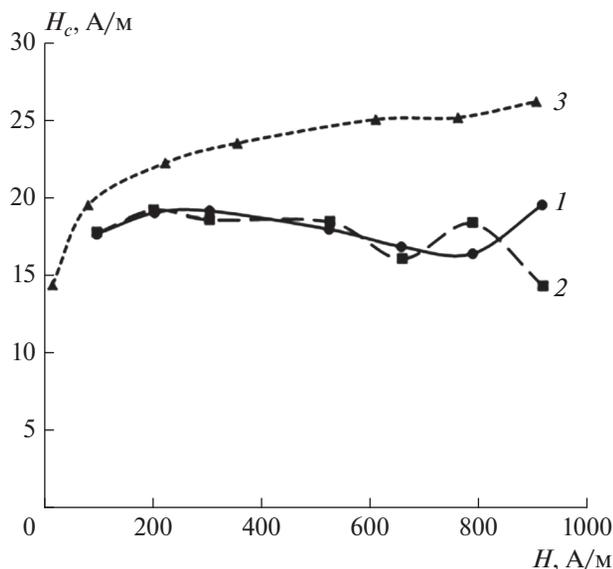


Рис. 1. Зависимость коэрцитивной силы H_c от напряженности магнитного поля H для сплава 2 при различных частотах f : 1 – 50, 2 – 60, 3 – 400 Гц.

сти аморфного сплава благодаря фиксации распределения стримеров вдоль аморфной ленты.

Состояние поверхности контролировалось оптическим микроскопом МКД-Р фирмы «ЛОМО» с видеокамерой, соединенной с компьютером. Были использованы следующие объективы: ПЛАН-АПО $F = 5$, ЛОМО 91036 и ЛОМО 91048. Для сохранения и обработки оптических снимков была использована программа Tour View 3.7 For Digital Camera.

Магнитные параметры измеряли по стандартной методике на вибрационном магнитометре VSM250 в магнитном поле 20 кЭ.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Наиболее заметная зависимость параметров сплава от частоты наблюдается для коэрцитивной силы H_c и удельных потерь на перемагничивание – см. рис. 1. Из рисунка видно, что коэрцитивная сила сравнительно мало изменяется с ростом намагниченности сплава при увеличении напряженности магнитного поля. В связи с этим при анализе влияния МИО на состояние сплава использовали лишь данные об изменении H_c и площади петли магнитного гистерезиса S . Наиболее заметные изменения этих параметров были обнаружены после обработки сплава 20 импульсами. После МИО сплава 1 изменения H_c и S составляют не более 10%. В то же время после обработки сплава, легированного никелем (сплав 2), наблюдаются более заметные изменения этих па-

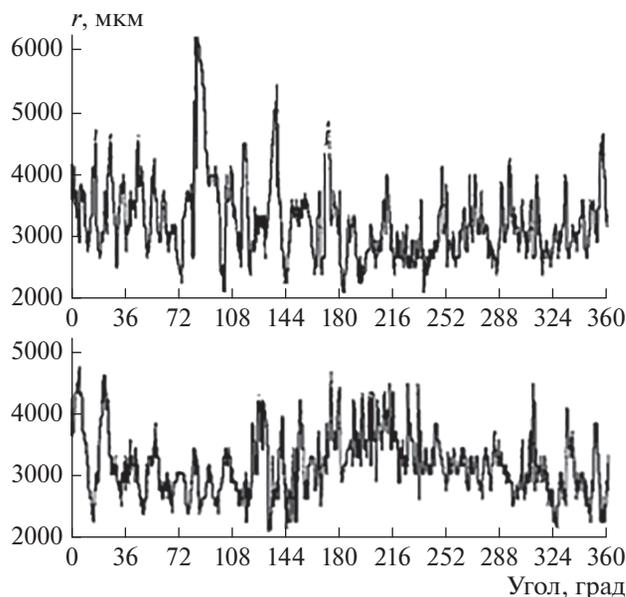


Рис. 2. Распределение стримеров поверхностного разряда при напряженности $1.1 \cdot 10^6$ В/м по длине ленты аморфного сплава (состав 2) до (нижний рисунок) и после (верхний рисунок) МИО 20 магнитными импульсами.

раметров: площадь петли увеличивается в 2 раза, а коэрцитивная сила – на 30%. Такие изменения связаны с эволюцией локальных неоднородностей, определяющих локальную анизотропию сплава, влияющую на плотность состояний $3d$ -электронов, что обеспечивает увеличение удельной намагниченности сплавов.

Изменение пространственной организации атомов обеспечивает появление мест с более высоким локальным возмущением электрического поля на поверхности сплава. Для оценки таких изменений были изучены эмиссионные свойства сплавов до и после МИО. В качестве примера на рис. 2 представлены картины распределения электронных лавин вдоль длины ленты в стереографической проекции, эмитируемых поверхностью сплава 2 до и после МИО при напряженности электрического поля $1.1 \cdot 10^6$ В \cdot м $^{-1}$. Они представляют совокупность большого числа узких максимумов различной интенсивности и ширины, отображающих геометрию и пространственное расположение центров эмиссии на поверхности сплава. Состояние и плотность таких центров изменяются не только после МИО, что отчетливо видно из микрофотографии поверхности сплава, контактирующей с воздушной средой при его быстром охлаждении (рис. 3).

Полученные картины позволяют рассчитать параметры электронных лавин, определяющих пространственно-энергетическую структуру разряда, лимитируемую особенностями ближнего порядка

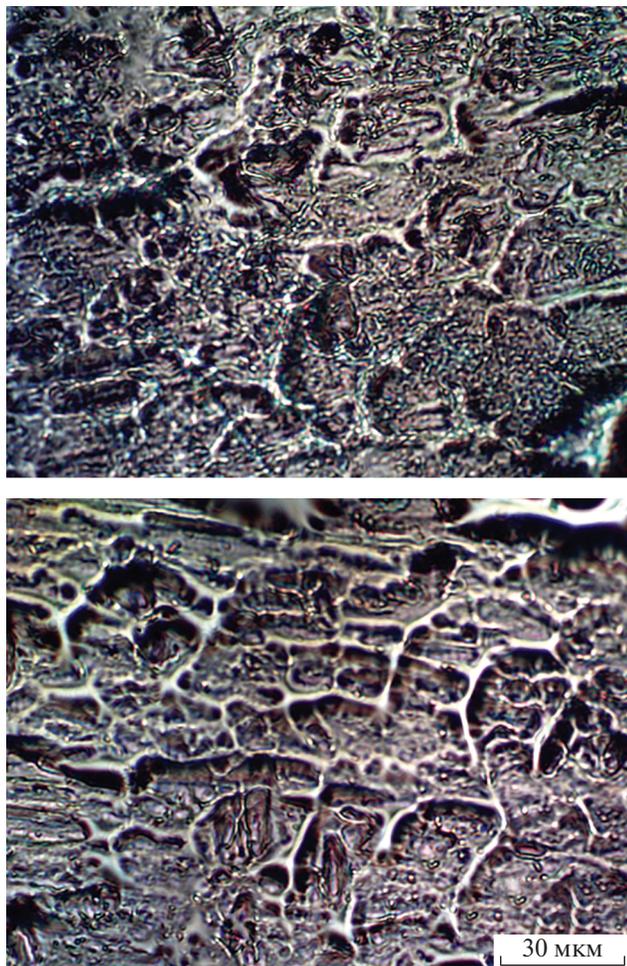


Рис. 3. Структура поверхности аморфного сплава (состав 2) до (нижний рисунок) и после (верхний рисунок) МИО 20 магнитными импульсами.

и геометрическими конфигурациями эмиссионных центров. Такими параметрами являются энтропия S_i , отображающая особенности ближнего порядка центров эмиссии, коэффициент фрактальности F_i , определяемый степенью разветвленности разрядных треков и связанный со спецификой процессов самоорганизации, обуславливающих изменение топологии поверхности, длина изолинии L_i , пропорциональная средней энергии эмитируемых электронов, зависящей от работы выхода электронов, их энергетического спектра. Наиболее заметная зависимость от напряженности поля наблюдается для длины изолинии и энтропии. До МИО наименьшее значение энтропии было свойственно составу 2, что соответствует наибольшей степени неупорядоченности эмиссионных центров. После МИО сплава наблюдается более высокая степень упорядочения. Наибольший эффект от МИО наблюдается для сплава 1, что проявляется на изменении длины изолинии,

определяемой особенностями энергетического барьера, преодолеваемого эмитируемыми электронами. Изменение длины изолинии после МИО зависит не только от состава, но и от напряженности электрического поля. Более того, anomальное увеличение длины изолинии при напряженности поля $13 \cdot 10^5 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1}$ можно предположительно связать с иницированием взрывной электронной эмиссии [8, 9]. Такая эмиссия может быть обусловлена наличием упорядоченных наночастинок с более высоким удельным сопротивлением [10, 11]. Действительно, такой эффект наблюдался только для поверхности сплава 1, контактирующего с воздушной атмосферой в процессе его сверхбыстрого охлаждения. В результате МИО появляются места с более высоким локальным возмущением электрического поля из-за уменьшения локальной электропроводности поверхности сплава [12, 13]. Действительно, как видно из рис. 2, после МИО уменьшается количество наноразмерных участков, эмитирующих электроны, и изменяется их геометрия. Ширина максимумов интенсивности, определяющих размеры участков, увеличивается в 2–4 раза, а расстояние между ними уменьшается примерно до 2 раз. Кроме того, цепочечная структура малых структурно-упорядоченных областей трансформируется в сетчатую (рис. 3).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Уменьшение коэрцитивной силы и потерь на перемагничивание сплавов после МИО обусловлено уменьшением константы анизотропии сплава в результате изменения пространственной организации атомов поверхности сплавов и их объемной части. Картины разрядных треков, отображающих положение и параметры центров эмиссии, позволили обнаружить изменение пространственно-энергетической структуры разряда, лимитирующей особенностями ближнего порядка эмиссионных центров и их локальной электропроводностью. Сделано предположение, что существующие в сплаве упорядоченные области после МИО трансформируются из “цепочечной” структуры в “сетчатую”. Установлено, что с ростом напряженности электрического поля возможно иницирование взрывной электронной эмиссии, которая обусловлена наличием наноразмерных участков оксидов с более высоким удельным сопротивлением, поскольку такой процесс наблюдается только для поверхности сплава, контактирующего с кислородом воздуха в процессе его сверхбыстрого окисления.

Исследования проведены при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-03-00271).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коровушкин В.В., Костишин В.Г., Степович М.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2016. Т. 80. № 12. С. 1643; Korovushkin V.V., Kostishyn V.G., Stepovich M.A., Shipko M.N. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2016. V. 80. No. 12. P. 1450.
2. Шипко М.Н., Тихонов А.И., Степович М.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2018. Т. 82. № 8. С. 1090; Shipko M.N., Tikhonov A.I., Stepovich M.A. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2018. V. 82. No. 8. P. 988.
3. Каминская Т.П., Коровушкин В.В., Попов В.В. и др. // Поверхн.: Рентген., синхротрон. нейтрон. иссл. 2014. № 12. С. 26; Kaminskaya T.P., Korovushkin V.V., Popov V.V. et al. // J. Surf. Invest. X-Ray. Synchrotron. Neutron Tech. 2014. V. 8. No. 6. P. 1235.
4. Viryus A.A., Kaminskaya T.P., Shipko M.N. et al. // J. Phys. Conf. Ser. 2020. V. 848. Art. No. 012085.
5. Егоров Н.В., Шешин Е.П. // Поверхн.: Рентген., синхротрон. нейтрон. иссл. 2017. № 3. С. 5; Egorov N.V., Sheshin E.P. // J. Surf. Invest. X-Ray. Synchrotron. Neutron Tech. 2017. V. 11. No. 2. P. 285.
6. Сахаров А.С., Иванов В.А. // УПФ. 2016. Т. 4. № 2. С. 150.
7. Коротков К.Г. Принципы анализа в ГРВ биоэлектрографии. Санкт-Петербург: Реноме, 2007. 286 с.
8. Фурсей Г.Н., Поляков М.А., Кантонистов А.А. и др. // ЖТФ. 2013. Т. 83. № 6. С. 71; Fursei G.N., Polyakov M.A., Kantonistov A.A. et al. // Tech. Phys. 2013. V. 58. No. 6. P. 845.
9. Fursei G.N. // Appl. Surf. Sci. 2003. V. 215. P. 113.
10. Никифоров Д.К., Коржавый А.П., Никифоров К.Г. // Изв. РГПУ им. А.И. Герцена. 2009. № 79. С. 153.
11. Forbes R.G., Xanthakis J.P. // Surf. Interface Anal. 2007. V. 39. No. 2–3. P. 139.
12. Салеев В.А. // Комп. опт. 2010. Т. 34. № 4. С. 531; Saleev V.A. // Comp. Opt. V. 34. No. 4. P. 531.
13. Эйдельман Е.Д., Архипов А.В. // УФН. 2020. Т. 190. № 7. С. 693; Eidel'man E.D., Arkhipov A.V. // Phys. Usp. 2020. V. 63. No. 7. P. 648.

Effect of magnetic pulse treatment on the surface state, emission, and magnetic properties of amorphous magnetic alloys

M. N. Shipko^{a,*}, M. A. Stepovich^b, A. L. Sibirev^a, A. I. Tikhonov^a,
E. S. Savchenko^c, T. P. Kaminskaya^d

^aLenin Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, 153003 Russia

^bTsiolkovsky Kaluga State University, Kaluga, 248023 Russia

^cNational University of Science and Technology "MISIS", Moscow, 119049 Russia

^dLomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

*e-mail: michael-1946@mail.ru

The effect of a weak pulsed magnetic field on the surface state, emission and magnetic properties of amorphous magnetic Fe(SiBNb) alloys has been studied. It was found that with an increase in the electric field strength, it is possible to initiate explosive electron emission, which is due to the presence of oxide nanoparticles with a higher resistivity on the surface.