

УДК 537.6/.8;53.098;537.622;54-165.2;54-161

ВЛИЯНИЕ МАГНИТОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ НА ЭМИССИОННЫЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ АМОРФНЫХ СПЛАВОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ

© 2021 г. М. Н. Шипко^{a, *}, А. Л. Сибирев^b, М. А. Степович^c, А. И. Тихонов^a, Е. С. Савченко^d

^aИвановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, Иваново, 153003 Россия

^bИвановский государственный химико-технологический университет, Иваново, 153000 Россия

^cКалужский государственный университет им. К.Э. Циолковского, Калуга, 248023 Россия

^dНациональный исследовательский технологический университет “МИСИС”, Москва, 119991 Россия

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

Поступила в редакцию 29.12.2020 г.

После доработки 25.02.2021 г.

Принята к публикации 28.02.2021 г.

Изучено влияние обработки слабыми импульсами магнитного поля на эмиссионные и магнитные свойства поверхностного слоя аморфных сплавов Fe(SiBNb), используемых в электротехнических устройствах. Для выявления участков локального возмущения электрического поля на микронеровностях поверхности использован метод газоразрядной визуализации. Изменения в характеристиках сплавов объяснено наличием микропримесей, которые инициируют переупорядочение атомов под влиянием магнитных импульсов, интенсифицирующих перенос зарядов между металлоидами и магнитоактивными атомами. Изучение энергетического спектра эмитируемых электронов позволило сделать вывод о превалировании квантоворазмерных эффектов в процессах электронной эмиссии.

Ключевые слова: аморфные сплавы, слабые импульсы магнитного поля, переупорядочение атомов, электронная эмиссия, квантоворазмерные эффекты

DOI: 10.31857/S1028096021090193

ВВЕДЕНИЕ

Возрастающий интерес к аморфным магнитным материалам связан с перспективами их широкого применения в высокоточных измерительных трансформаторах, электронных счетчиках электрической энергии, электрических машинах нового поколения. В зависимости от состава и параметров их технологии удается получать составы с высокой магнитной индукцией, коэффициентом прямоугловности петли магнитного гистерезиса, удельным электрическим сопротивлением при относительно низких значениях магнитострикции [1, 2]. Ввиду того, что чаще всего эти сплавы изготавливаются по тонкопленочной технологии или в результате сверхбыстрого охлаждения, их электромагнитные свойства во многом лимитируются состоянием поверхности, особенностями поверхностной миграции атомов [3]. Это обусловлено тем, что поверхность таких материалов представляет сложную систему атомов с различной пространственной организацией и их ближним порядком, которые легко изменяются в результате внешних электромагнитных воздействий или воздействий полей измерительных

приборов [4]. Это обеспечивает выход такой системы атомов из состояния равновесия, появления локальных участков поверхности с измененной степенью позиционного порядка в расположении атомов. Такие участки представляют собой неоднородности в распределении электрических полей, характеризуются высокими значениями их градиентов, которые обеспечивают изменение энергетического состояния зарядов и, как следствие, изменение микроскопических свойств сплавов. Для изучения особенностей состояний таких неоднородностей на молекулярном уровне используют различные методы, один из которых основывается на автоэлектронной эмиссии поверхности материалов [5–7]. В настоящее время автоэлектронная эмиссия является не только специфическим типом эмиссии, используемых в новых поколениях электронных устройств, но и процессом, открывающим большие возможности для диагностики состояния поверхности конденсированных сред [8]. Это обусловлено тем, что вероятность возникновения электронных лавин, эмитируемых поверхностью материала, наиболее высокая для участков локального возмущения электрического поля на ее микронеровностях. Для

выявления таких участков весьма перспективным является их визуализация газоразрядным методом, который реализуется в приборе “Камера газоразрядной визуализации” [7]. Камера обеспечивает визуализацию процесса полевой эмиссии электронов из поверхности аморфного сплава и обеспечивает получение ее газоразрядного изображения, определяемого ближним порядком атомов, локальной электропроводностью и диэлектрической проницаемостью, эмиссионными свойствами аморфного сплава. Это изображение формируется в результате ионизации воздуха электронами, эмитируемыми поверхностью сплава и набирающими в электрическом поле прибора энергию, достаточную для такой ионизации. В результате указанных процессов на поверхности полупрозрачного электрода формируется поверхностный лавинно-стримерный разряд, фотографии разрядных треков которого отображают особенности состояния поверхности сплава, связанные с локальными неоднородностями. Вследствие их воздействия на параметры разряда (интенсивность, длительность, частоту и пространственное распределение разрядных треков) имеется возможность выявить характер неоднородностей и специфику их влияния на электромагнитные свойства аморфного сплава. В то же время параметры материалов во многом могут зависеть от их предварительной обработки, например, магнитными полями. Ранее объектами для таких исследований в основном служили твердые тела, при этом использовались стандартные методы исследований, например [9–14]. В последние годы начались исследования влияния слабых импульсных магнитных полей на ориентационные явления в жидких объектах с использованием метода газоразрядной визуализации (ГРВ) [15–19]. Однако сведения об использовании метода ГРВ для диагностики состояния поверхности аморфных сплавов после электромагнитных воздействий в литературе отсутствуют.

Целью настоящей работы является изучение влияния импульсов слабого магнитного поля на параметры автоэлектронной эмиссии и магнитные свойства аморфных сплавов $\text{Fe}(\text{SiNb})$, используемых в электротехнических устройствах.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Объектами для исследования служили аморфные сплавы состава $\text{Fe}_{73,5}(\text{SiNb})_{26,5}$, легированные никелем. Образцы, полученные методом сверхбыстрого охлаждения расплава на вращающемся барабане, представляли собой ленту толщиной около 100 мкм, шириной 10 мм, длиной 50 мм. Для их магнитоимпульсной обработки (МИО) использовали импульсы магнитного поля амплитудой $(5-8) \times 10^3 \text{ А/м}^2$, длительностью 0.1–0.5 с с интервалом между импульсами 1–2 с. Количе-

ство импульсов составляло 10–50. Магнитные параметры измеряли по стандартной методике на вибрационном магнитометре VSM250 в магнитном поле 20 кЭ.

Исследование параметров автоэлектронной эмиссии сплавов осуществляли в камере газоразрядной визуализации (ГРВ). Блок-схема камеры представлена на рис. 1. Фольгу аморфного сплава 5 фиксировали на поверхности металлического цилиндра 1. Она являлась эмиттером электронов. Систему устанавливали на прозрачный кварцевый электрод с токопроводящим покрытием 2. Между электродами 1 и 2 подавались биполярные электрические импульсы амплитудой 9, 11 и 13 кВ частотой 1024 Гц. Такие импульсы обеспечивали наиболее слабое влияние электромагнитного поля прибора на состояние сплава из-за ослабления миграционных процессов на поверхности фольги и повышение стабильности автоэмиссионного тока. Под действием электрического поля электроны, эмитируемые поверхностью сплава с энергией, достаточной для ионизации воздуха, формировали электронные лавины, которые, распространяясь по поверхности стекла фотокамеры, образовывали скользящий поверхностный разряд, следы разрядных треков которого фиксировались фотокамерой 4. Фотография треков отображала картину расположения локальных неоднородностей на поверхности сплава. Так как наблюдаемая фотографическая картина представляет суперпозицию изображений разрядных треков от положительного и отрицательного импульсов и создает значительные трудности для ее интерпретации, она подвергалась компьютерной обработке. При обработке использовали программу GDV-Scientific, которая позволяет определить параметры разряда, поддающиеся количественным оценкам, а также сделать визуализацию параметров локальных неоднородностей на поверхности аморфного сплава благодаря фиксации распределения стримеров вдоль аморфной ленты. В качестве основных параметров разряда, поддающихся количественным оценкам, были выбраны следующие: длина и ширина разрядных треков, их количество и интенсивность. Их измерение обеспечивало возможность определения статистических характеристик картин ГРВ, лимитируемых состоянием поверхности и коррелирующих с распределением эмитируемых электронов по энергиям: площадь свечения, длина изолинии, энтропия и фрактальность изолинии, интенсивность и распределение треков по длине.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 2 приведены примеры распределения стримеров по длине ленты аморфного сплава в исходном состоянии и после его МИО (20 импульсов) при разности потенциалов в межэлектродном

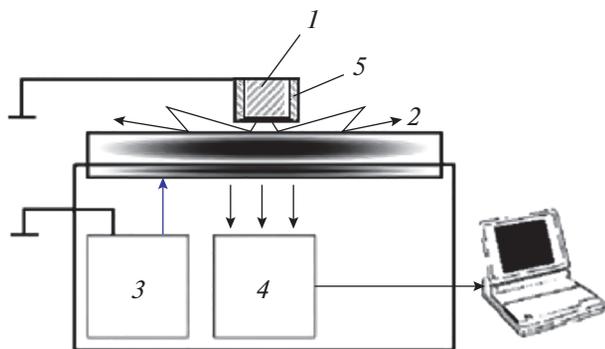


Рис. 1. Блок-схема установки на основе прибора газоразрядной визуализации “ГРВ-камера”: 1 – металлический цилиндр, 2 – кварцевый электрод с токопроводящим покрытием, 3 – генератор импульсов напряжения, 4 – оптическая система, 5 – фольга аморфного сплава.

промежутке 11 кВ. При такой разности потенциалов наблюдаются отчетливые треки газоразрядного изображения. При напряжении 13 кВ наблюдается их ветвление. При 9 кВ следы распространения электронных лавин, исходящих из областей наиболее сильного возбуждения электрических полей, не отображают истинной картины распределения максимумов интенсивности электронной эмиссии сплава. По расстоянию между максимумами интенсивности эмиссии можно судить о неконтролируемом распределении локальных неоднородностей по поверхности сплава. Полученные картины ГРВ позволили рассчитать параметры электронных лавин, определяющих пространственно-временную структуру разряда. В табл. 1 приведены значения рассчитанных параметров для аморфных сплавов двух составов до и после их МИО. Видно, что параметры картин ГРВ зави-

сят как от состояния сплава, так и от напряженности электрического поля, возбуждающего эмиссию электронов. Наиболее заметная зависимость от состояния сплава при оптимальной напряженности поля между электродами ($U = 11$ кВ) наблюдается для длины изолинии, средней интенсивности свечения, энтропии и фрактальности. Эти же характеристики испытывают заметные изменения и при повышении напряженности электрического поля между электродами прибора ГРВ. Наблюдаемые изменения характеристик разряда связаны с зависимостью плотности и энергии эмитируемых электронов от локальных свойств поверхности сплава и напряженности электрического поля. Учитывая тот факт, что энергия электронов сказывается (прежде всего) на длине стримеров, для интерпретации природы влияния импульсов магнитного поля на состояние поверхности, были рассчитаны распределения стримеров по длине (рис. 3, 4). Из сопоставления приведенных распределений видно, что МИО неодинаковым образом влияет на состояние сплавов и их поверхности. Для сплава состава 1, не содержащего легирующих атомов никеля, наблюдается одиночный симметричный максимум распределения стримеров по длине. Положение максимума совпадает с положением максимума тестового металлического цилиндра с высокой степенью однородности его поверхности. Более того, малая ширина максимумов указывает на то, что эмитируемые электроны характеризуются узким энергетическим спектром. Параметры максимума не изменяются и после МИО сплава. Для сплава, легированного никелем, наблюдается асимметричный максимум. Степень его асимметрии увеличивается после МИО. Появляются максимумы, соответствующие более высоким значениям энергии электронов, состоя-

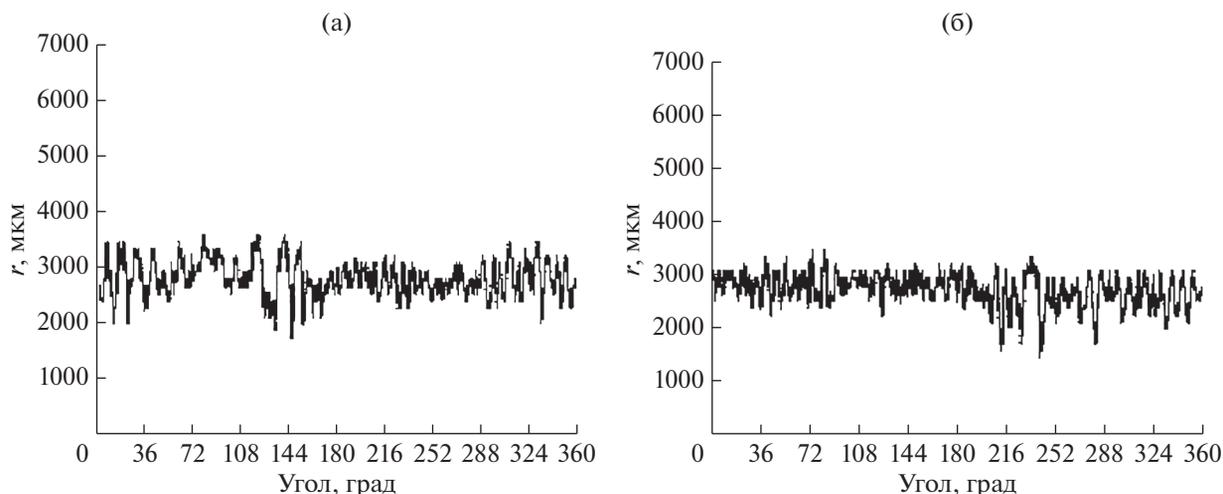


Рис. 2. Распределение стримеров по длине ленты для образца аморфного сплава $Fe_{73.5}(SiBNd)_{26.5} + Ni$ до (а) и после (б) магнитоимпульсной обработки 20 импульсами.

Таблица 1. Статистические параметры картин ГРВ для аморфных сплавов $Fe_{73.5}(SiBNd)_{26.5}$ без легирования (состав 1) и с легированием атомами никеля (состав 2) до и после магнитоимпульсной обработки 20 импульсами при разности потенциалов U между электродами 9, 11 и 13 кВ

U , кВ	Состав	Состояние сплава	Площадь свечения, пиксель $\times 10^4$	Средняя интенсивность свечения, отн. ед.	Энтропия по изолинии, отн. ед.	Фрактальность по изолинии, отн. ед.	Длина изолинии, мкм
9	1	До МИО	1.46	131.2	2.18	1.95	845
		После МИО	1.57	120.5	2.49	1.89	1018
	2	До МИО	1.45	127.9	2.06	1.95	792
		После МИО	1.45	129.8	2.16	1.89	801
11	1	До МИО	1.78	144.3	2.20	1.95	923
		После МИО	2.03	129.3	2.63	1.90	1098
	2	До МИО	1.92	140.4	2.39	1.91	940
		После МИО	2.1	132.4	2.63	1.86	1073
13	1	До МИО	3.60	127.0	3.16	1.88	1294
		После МИО	3.56	121.8	3.26	1.91	1720
	2	До МИО	3.57	124.8	3.31	1.79	1323
		После МИО	3.52	122.8	3.2	1.70	1404

ния которых соответствуют высокой степени их возбуждения в местах повышенной поверхностной неоднородности.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ особенностей трансформации параметров стримерного разряда, наблюдающегося для аморфных сплавов до и после МИО, указывает на их зависимость от наличия легирующих ато-

мов никеля. В частности, для сплава, не содержащего легирующих атомов никеля, МИО оказывает влияние на параметры, указывающие на повышение степени ближнего порядка в расположении атомов, характеризуемого энтропией и фрактальностью (табл. 2). В результате такого упорядочения увеличиваются параметры, определяемые энергией эмитируемых электронов (площадь свечения и длина изолинии). Учитывая, что сред-

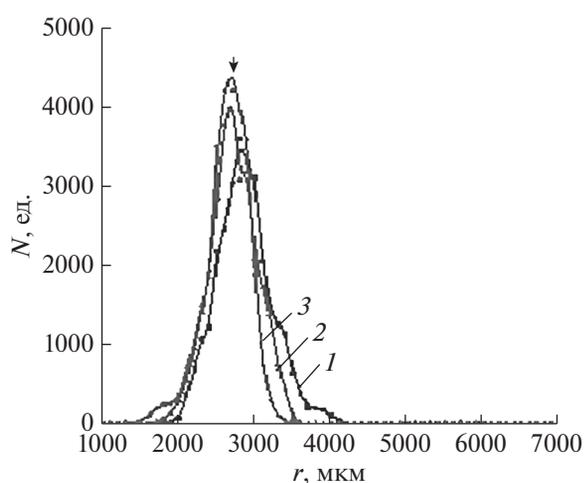


Рис. 3. Распределение стримеров по их длине для образца нелегированного никелем аморфного сплава $Fe_{73.5}(SiBNd)_{26.5}$ до (2) и после (3) магнитоимпульсной обработки 20 импульсами в сопоставлении с результатами измерений для металлического цилиндра (1).

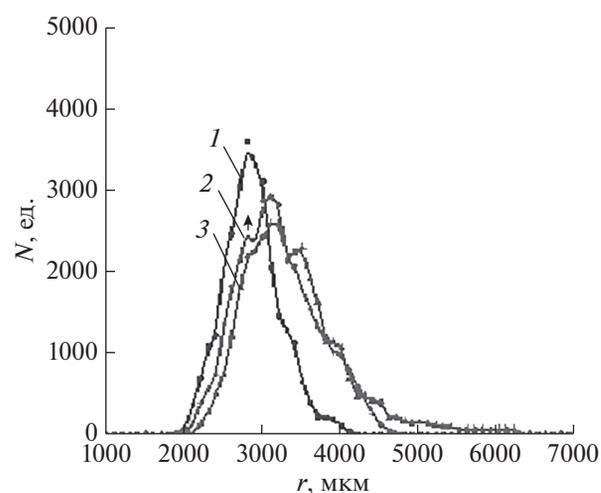


Рис. 4. Распределение стримеров по их длине для образца легированного никелем аморфного сплава $Fe_{73.5}(SiBNd)_{26.5} + Ni$ до (2) и после (3) обработки 20 магнитными импульсами в сопоставлении с результатами измерений для металлического цилиндра (1).

Таблица 2. Магнитные свойства аморфных сплавов $\text{Fe}_{73.5}(\text{SiBNd})_{26.5}$ до и после магнитоимпульсной обработки

Состав	Число магнитных импульсов	Удельная намагниченность насыщения M_s , А/м	Коэрцитивная сила H_c , кА/м	Площадь петли, $\text{А} \times \text{м}^2 \times \text{кг}$
1	0	157	3.0	5.8
	20	166	2.8	4.1
2	0	132	3.3	5.4
	20	139	2.3	2.7

няя интенсивность свечения определяется средним количеством эмитируемых электронов, ее уменьшение для сплава (состав 1) после его МИО указывает на изменение локального порядка в расположении атомов в меньшей степени, чем для сплава, легированного никелем. Это в большей степени следует из сопоставления картин распределения стримеров по длине и данных по магнитным свойствам сплавов (табл. 2). Действительно, изменение коэрцитивной силы H_c и площади петли S_n магнитного гистерезиса, зависящих от симметрии локальных полиэдров и особенностей ближнего порядка в расположении атомов, характерно лишь для сплава состава 2. После обработки сплава 1 магнитными импульсами обнаружено изменение H_c и S_n не более чем на 10%. В то же время после МИО сплава, легированного никелем, наблюдается существенное уменьшение площади петли (в 2 раза) и коэрцитивной силы H_c на 30%.

Учитывая повышение количества электронов с более высоким значением энергии, эмитируемых поверхностью этого сплава после его МИО, можно предположить наличие значительного повышения напряженности локального электрического поля на микронеоднородностях поверхности сплава. Такое повышение может быть связано, как показывает повышение энтропии и фрактальности свечения, с локальным переупорядочением атомов под действием импульсов магнитного поля. В свою очередь, переупорядочение может вызвать изменение симметрии локальных полиэдров и дополнительный перенос зарядов между металлоидами и магнитоактивными атомами Fe и Ni.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные исследования указывают на возможность изучения изменений состояния поверхности аморфных сплавов методом автоэлектронной эмиссии после их магнитоимпульсной обработки. Диагностика электронных состояний различных участков поверхности аморфных сплавов позволила выявить наличие локальных возмущений электрического поля на ее микронеоднородностях и использовать их для интерпретации изменения магнитных свойств сплавов по-

сле воздействия магнитных импульсов. Ключевая роль в таких изменениях отводится наличию микропримесей, которые инициируют переупорядочение атомов под влиянием магнитных импульсов, интенсифицирующих перенос зарядов между металлоидами и магнитоактивными атомами. Расширение энергетического спектра эмитируемых электронов свидетельствует в пользу превалирования квантоворазмерных эффектов в процессах электронной эмиссии.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследования выполнены 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 № 18-41-400001).

Авторы признательны сотрудникам ООО “НПК “Автоприбор” (г. Владимир) за предоставленные образцы сплавов и участие в обсуждении результатов работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Егоров Н.В., Шешин Е.П.* Автоэлектронная эмиссия. Принципы и приборы. Долгопрудный: Интеллект, 2011. 704 с.
2. *Глезер А.М., Молотилов Б.В.* Структура и механические свойства аморфных сплавов. М.: Металлургия, 1992. 208 с.
3. *Егоров Н.В., Шешин Е.П.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2017. № 3. С. 5. <https://doi.org/10.7868/S0207352817030088>
4. *Белянин А.Ф., Борисов В.В., Самойлович М.И., Багдасарян А.С.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2017. № 3. С. 16. <https://doi.org/10.7868/S0207352817030052>
5. *Сахаров А.С., Иванов В.А.* // Успехи прикладной физики. 2016. Т. 4. № 2. С. 150.
6. *Шешин Е.П.* Структура поверхности и автоэлектронные свойства углеродных материалов. М.: МФТИ. Физматкнига, 2001. 287 с.
7. *Коротков К.Г.* Принципы анализа в ГРВ биоэлектрографии. Санкт-Петербург: Реноме, 2007. 286 с.
8. *Брусиловский Б.А.* Кинетическая ионно-электронная эмиссия. М.: Энергоатомиздат, 1990. 184 с.
9. *Альшиц В.И., Даринская Е.В., Колдаева М.В., Петрижик Е.А.* // Кристаллография. 2003. Т. 48. № 5. С. 826.

10. Шипко М.Н., Тихонов А.И., Степович М.А., Коровушкин В.В., Савченко Е.С., Корнев И.А. // Прикладная физика. 2018. № 4. С. 94.
11. Каминская Т.П., Коровушкин В.В., Попов В.В., Шипко М.Н., Степович М.А. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2014. № 12. С. 26. <https://doi.org/10.7868/S0207352814120117>
12. Шипко М.Н., Тихонов А.И., Степович М.А., Вирюс А.А., Каминская Т.П., Коровушкин В.В., Савченко Е.С., Еремин И.В. // Известия РАН. Серия физическая. 2018. Т. 82. № 8. С. 1090. <https://doi.org/10.1134/S0367676518080379>
13. Шипко М.Н., Коровушкин В.В., Савченко А.Г., Степович М.А., Бахтеева Н.Д., Савченко Е.С., Тодорова Е.В. // Прикладная физика. 2019. № 3. С. 81.
14. Viryus A.A., Kaminskaya T.P., Shipko M.N., Bakhteeva N.D., Korovushkin V.V., Savchenko A.G., Stepovich M.A., Savchenko E.S., Todorova E.V. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. V. 848. Art. № 012085. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/848/1/012085>
15. Шипко М.Н., Степович М.А., Сибирев А.Л., Усольцева Н.В., Масленникова О.М., Смирнова А.И. // Известия РАН. Серия физическая. 2018. Т. 82. № 8. С. 1058. <https://doi.org/10.1134/S0367676518080367>
16. Stepovich M.A., Maslennikova O.M., Shipko M.N., Sibirev A.L., Chrishtop V.V. // J. Cardiology and Cardiovascular Therapy. 2018. V. 9. № 4. JOCCT.MS.ID. 55577. <https://doi.org/10.19080/JOCCT.2018.09.555770>
17. Шипко М.Н., Усольцева Н.В., Сибирев А.Л., Масленникова О.М., Степович М.А., Смирнова А.И. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2019. № 8. С. 102. <https://doi.org/10.1134/S020735281908016X>
18. Степович М.А., Шипко М.Н., Сибирев А.Л., Смирнова А.И., Усольцева Н.В. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2019. № 12. С. 88. <https://doi.org/10.1134/S1028096019120306>
19. Шипко М.Н., Степович М.А., Сибирев А.Л., Мельникова О.С., Смирнова А.И., Усольцева Н.В. // Известия РАН. Серия физическая. 2020. Т. 84. № 7. С. 994. <https://doi.org/10.31857/S0367676520070273>

Influence of Magneto-Pulse Treatment on Emission and Magnetic Properties of the Surface Layer of Amorphous Alloys Used in Electrical Engineering

M. N. Shipko^{1, *}, A. L. Sibirev², M. A. Stepovich³, A. I. Tikhonov¹, and E. S. Savchenko⁴

¹Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, 153003 Russia

²Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Ivanovo, 153000 Russia

³Tsiolkovsky Kaluga State University, Kaluga, 248023 Russia

⁴National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, 119991 Russia

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

The effect of treatment by weak pulses of a magnetic field on the emission and magnetic properties of the surface layer of amorphous Fe(SiBNb) alloys used in electrical devices has been studied. To identify areas of local disturbance of the electric field on microroughnesses of the surface, the method of gas-discharge visualization was used. Changes in the characteristics of alloys are explained by the presence of trace impurities that initiate the reordering of atoms under the influence of magnetic pulses, which intensify the transfer of charges between metalloids and magnetoactive atoms. The study of the energy spectrum of the emitted electrons made it possible to draw a conclusion about the prevalence of quantum-size effects in the processes of electron emission.

Keywords: amorphous alloys, weak pulses of a magnetic field, reordering of atoms, electron emission, quantum size effects.