

УДК 538.955:537.632/.636:53.098:537.621:537.528

## ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПОДВОДНОЙ ПЛАЗМЫ И МАГНИТОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ ЛЕНТОЧНЫХ АМОРФНЫХ СПЛАВОВ FeSiBNb

© 2025 г. М. Н. Шипко<sup>а,\*</sup>, М. А. Степович<sup>б</sup>, А. В. Хлюстова<sup>с</sup>, Н. А. Сироткин<sup>с</sup>,  
Т. П. Каминская<sup>д</sup>, А. В. Стулов<sup>е</sup>, Е. С. Савченко<sup>ф</sup>

<sup>а</sup>Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, Иваново, 153003 Россия

<sup>б</sup>Калужский государственный университет им. К.Э. Циолковского, Калуга, 248023 Россия

<sup>с</sup>Институт химии растворов им. Г.А. Крестова РАН, Иваново, 153045 Россия

<sup>д</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет,  
Москва, 119991 Россия

<sup>е</sup>ООО “Научно-производственный комплекс “Автоприбор”, Владимир, 600016 Россия

<sup>ф</sup>Национальный исследовательский технологический университет “МИСиС”, Москва, 119049 Россия

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

Поступила в редакцию 11.11.2024 г.

После доработки 24.12.2024 г.

Принята к публикации 24.12.2024 г.

Методами растровой электронной, оптической и сканирующей зондовой микроскопии исследована структура поверхности неотожженных аморфных сплавов — фольг состава  $\text{Fe}_{73}(\text{SiBNb})_{27}$  и сплавов того же состава с добавкой 1% Cu, полученных методом сверхбыстрого охлаждения распыленного расплава на вращающемся медном барабане. На свободных поверхностях фольг, не прилегающих к вращающемуся барабану, обнаружены микрообразования, неровности с “остриями” с характерными размерами менее 0.5 мкм, что в процессе эксплуатации электротехнических изделий может стать причиной возникновения на поверхности фольги градиентов электрического поля. Воздействие подводной плазмы на исследованные материалы к изменению их магнитных характеристик не привело. Для фольги  $\text{Fe}_{73}(\text{SiBNb})_{27}$  с добавкой 1% Cu, обработанной 10 и 40 импульсами слабого магнитного поля (с напряженностью 10–100 кА/м) низкой частоты (10–20 Гц), обнаружен магнитный контраст. В режиме фазового контраста после воздействия 40 импульсами магнитного поля на поверхности образца с Cu обнаружены треугольные фигуры, связываемые с появлением замыкающих призматических доменов, ширина доменных стенок которых ориентировочно составляет 1–2 мкм. После воздействия 10 импульсами магнитного поля возникает магнитный контраст специфической формы, который наблюдали на всей исследованной площади фольги. Также для фольги  $\text{Fe}_{73}(\text{SiBNb})_{27}$  с добавкой 1% Cu имелась слабая зависимость удельной намагниченности и коэрцитивной силы от количества магнитных импульсов.

**Ключевые слова:** сканирующая зондовая микроскопия, ленточные аморфные сплавы, морфология поверхности.

**DOI:** 10.31857/S1028096025030134, **EDN:** EMKJLW

### ВВЕДЕНИЕ

Качество значительного числа устройств, работающих в гигагерцовом диапазоне, обеспечивается уровнем электромагнитных характеристик ленточных аморфных сплавов, используемых в качестве магнитопроводов [1]. Электромагнит-

ные свойства таких устройств во многом определяются состоянием поверхности получаемых фольг. Среди аморфных сплавов значительный интерес представляют сплавы Fe–Si–B–Nb, полученные методом сверхбыстрого охлаждения распыленного расплава на быстро вращающемся

медном барабане (спиннингованием), так как на их поверхности могут наблюдаться упорядоченные области в виде цепочек или лент, обеспечивающие инициирование взрывной электронной эмиссии, а также механические напряжения, лимитирующие случайную анизотропию [2, 3]. Поэтому обеспечение уникальных магнитных свойств аморфных сплавов в большой степени связано с механизмом подавления макроскопической анизотропии, обусловленной состоянием поверхности магнитных материалов. Весьма привлекательными способами для решения этой задачи является использование функциональных покрытий на поверхности аморфных фольг или их магнитоимпульсная обработка (МИО) [2, 4–10]. Одним из перспективных методов устранения дефектов морфологии аморфных лент может быть нанесение в подводной плазме нанодисперсных порошков ферритов с размерами частиц менее 100 нм [11–13]. Такие частицы обладают требуемыми магнитными свойствами в коротковолновой части сантиметрового диапазона длин волн, а также электромагнитной совместимостью с аморфными сплавами на основе железа. Вместе с тем высокий уровень магнитных характеристик таких сплавов, их динамические характеристики, уровень удельных магнитных потерь во многом зависят от вида доменной структуры, ширины доменов, типа доменных границ, намагниченности насыщения. Несмотря на тот факт, что до сих пор отсутствует полное понимание взаимосвязи доменной структуры с высокочастотными свойствами аморфных сплавов, определение такой связи для указанных материалов является принципиальным. В силу того, что доменная структура аморфных сплавов, полученных методом спиннингования, определяется их локальной структурой, в том числе структурой их поверхности, использование сканирующей зондовой микроскопии для изучения морфологии поверхности образцов, прошедших обработку подводной плазмой и/или слабыми магнитными импульсами, в сочетании с изучением магнитных свойств этих материалов является весьма перспективным направлением исследований.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Образцы аморфной электротехнической стали (фольги) представляли собой ленты толщиной около 100 мкм, шириной 45 мм и были получены методом сверхбыстрого охлаждения при распылении расплава на вращающемся медном барабане. Исследовали неотожженные аморфные сплавы состава  $\text{Fe}_{73}(\text{SiBNb})_{27}$  и такие же сплавы с добавкой 1% Cu, влияющей на процесс кластеризации в процессе последующего термического отжига [14].

Методика возбуждения подводной плазмы довольно подробно изложена в [12, 13]. Подводный импульсный разряд инициировался между железными электродами диаметром 1 мм, помещенными в термостойкую керамическую трубку, межэлектродное расстояние составляло 3 мм. Средний ток разряда составлял 0.25 А, амплитудное значение тока в импульсе достигало 0.8 А, средняя разность потенциалов между электродами равнялась 700 В. Средняя частота разрядных импульсов составляла 9 Гц при коэффициенте заполнения около 2%. Энергия единичного разрядного импульса равнялась 11 Дж, общая мощность разряда составляла 70 Вт. В первой серии экспериментов закрепленный на держателе образец фольги находился на расстоянии около 5 мм от плазмы, тогда как во второй серии экспериментов расстояние составляло 25 мм.

Для магнитоимпульсной обработки использовали импульсы слабого магнитного поля (с напряженностью 10–100 кА/м) низкой частоты (10–20 Гц) — подробнее в работах [9–11] и цитируемой в них литературе. При проведении исследования на фольгу воздействовали 10, 20, 30, 40 импульсами.

Предварительные исследования состояния поверхностей на большой площади проводили с помощью оптического микроскопа МКД-Р фирмы “ЛОМО” с видеокамерой, соединенной с компьютером. Были использованы объективы: ПЛАН-АПО  $F=5$  и ЛОМО 91048. Для сохранения и обработки оптических снимков была использована программа Tour View 3.7 For Digital Camera. С использованием оптического и/или растрового электронного микроскопов для исследований методами сканирующей зондовой микроскопии выбирали участки поверхности фольг, имевшие сравнительно небольшие неровности, не оказывающие необратимого воздействия на кантилеверы. Локальные свойства поверхности фольг исследовали по стандартной двухпроходной методике [15, 16] с использованием сканирующего зондового микроскопа SMENA-A, платформа “Solver” (NT-MDT, РФ, Зеленоград, Москва). Образцы исследовали в полуконтактном режиме при комнатной температуре с использованием стандартных кремниевых кантилеверов MFM01 с радиусом закругления кончика иглы 20–30 нм при частоте 70–90 кГц.

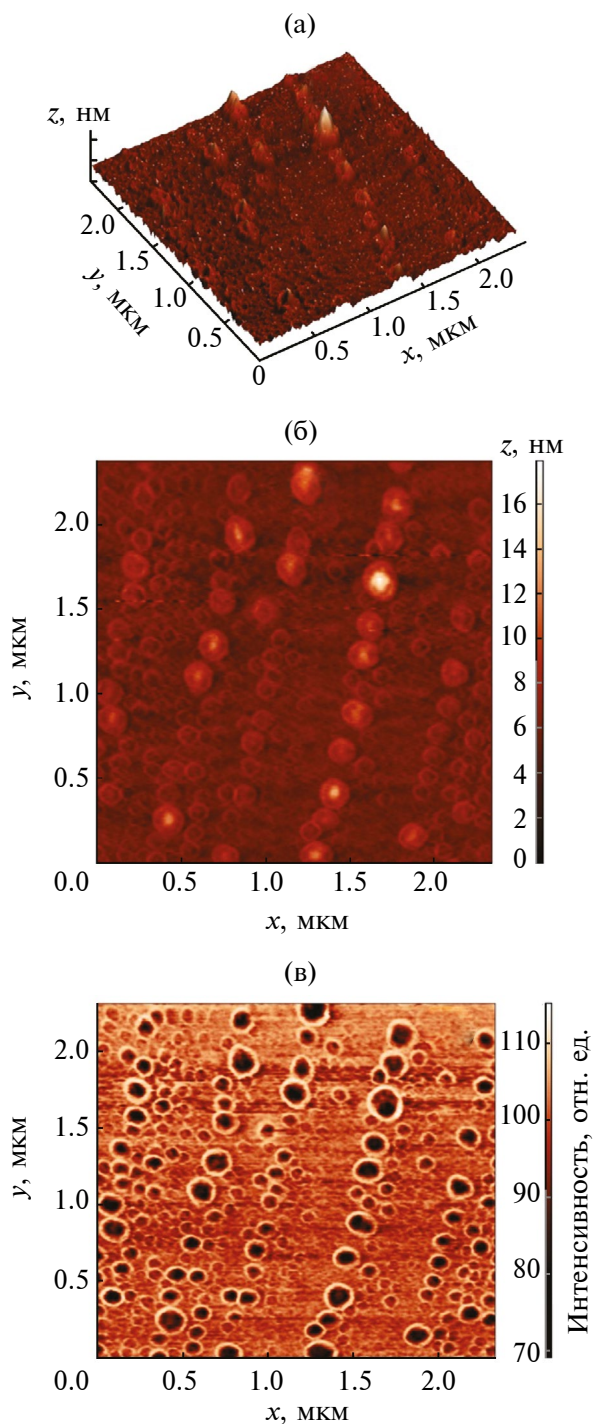
Магнитные параметры — параметры петель магнитного гистерезиса, кривые намагничивания и размагничивания — измеряли по стандартной методике на вибрационном магнитометре VSM 250 в магнитном поле напряженностью 1591.5 кА/м (20 кЭ).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сторона фольги, не прилегавшая к медному барабану, так называемая “свободная поверхность”, была ровной и блестящей. Другая поверхность образцов, прилегавшая к медному барабану (“контактная поверхность”), имела неоднородную, характерную для всех быстрозакаленных образцов структуру, вследствие чего визуально эта поверхность фольги казалась матовой.

Отметим, что характер поверхности аморфных сплавов состава  $\text{Fe}_{73}(\text{SiBNb})_{27}$  и сплавов с добавкой 1% Cu при сканировании с помощью атомного силового микроскопа (АСМ) участков от  $50 \times 50$  мкм и больше имел во многом одинаковую структуру, и далее для таких участков имеющиеся различия в составах отмечаться не будет. После магнитоимпульсной обработки исследованных образцов их сильное различие выявлено при использовании методов магнитно-силовой микроскопии (МСМ) (см. ниже).

При сканировании с помощью АСМ свободной поверхности фольги размерами  $2.5 \times 2.5$  мкм при амплитудном контрасте в трехмерном виде на поверхности были визуализированы неоднородности, часть из которых в выбранном масштабе можно назвать “остриями” (рис. 1а). На рис. 1 явно видна упорядоченное расположение этих неровностей, которое можно описать как цепь полых цилиндрических фигур. Внешний диаметр цилиндров не более 0.2 мкм, а их толщина примерно 0.06–0.08 мкм. Внутри цилиндрических полостей наблюдали конусообразные образования, “выходящие” из цилиндров и которые в выбранном масштабе можно назвать “остриями”. На рис. 1а в трехмерном виде на цепочке неровностей в верхней части видно довольно высокое (около 15 нм) образование, “выходящее” из полости цилиндра, а в нижней части этой цепочки два таких же образования имеют меньшую высоту. Этот же участок на двумерном изображении представлен на рис. 1б и 1в. Здесь также довольно хорошо видны эти цепочки, а рис. 1в дает основание предположить, что цилиндры и “вырастающие” из них конусы могут иметь разный состав. На рис. 1а и 1б практически на всей поверхности фольги слабо заметны и более мелкие неровности с размерами около 0.05–0.1 мкм, которые хорошо визуализированы на рис. 1в. Поскольку характерные размеры таких образований существенно меньше 0.5 мкм, провести локальный рентгено-спектральный анализ и определить состав отдельно для цилиндра и для конуса является весьма непростой задачей. В то же время наличие таких образований — неровностей с “остриями” —



**Рис. 1.** Изображение участка свободной поверхности ленточного аморфного сплава Fe–Si–B–Nb, полученное с помощью атомно-силовой микроскопии: в режиме амплитудного контраста в трехмерном (а) и двумерном (б) виде; в режиме фазового контраста в двумерном виде (в).

в процессе эксплуатации фольги может привести к возникновению на их поверхности градиентов электрического поля, что может быть нежелательно для электротехнических устройств.

Неровностей с “остриями”, обнаруженными до магнитоимпульсной обработки или воздействия подводной плазмы на свободных поверхностях фольг, на контактных поверхностях зарегистрировано не было. Исследования аморфных фольг до магнитоимпульсной обработки не выявили магнитного контраста [17].

Поверхность фольг после воздействия подводной плазмы визуально приобрела оттенки разных цветов, от близкого к красному до фиолетового. При выбранных режимах работы установки получить равномерное покрытие поверхностей не удалось. Типичный вид такой поверхности фольги представлен на рис. 2. Воздействие подводной плазмы на исследованные материалы к изменению их магнитных характеристик не привело.

В отличие от воздействия подводной плазмы, после магнитоимпульсной обработки фольг аморфных сплавов состава  $\text{Fe}_{73}(\text{SiBNb})_{27}$  с добавкой 1% Cu был выявлен магнитный контраст. Так, на рис. 3 представлены результаты МСМ-исследований фольги  $\text{Fe}_{73}(\text{SiBNb})_{27}$  с добавкой 1% Cu после воздействия 40 импульсами магнитного поля. На МСМ-изображении в фазовом контрасте видны треугольные фигуры. Судя по всему, выявленная нами структура магнитных доменов, согласно модельным представлениям, представляет собой замыкающие призматические домены модели Ландау–Лифшица, наблюдаемые в доменной структуре монокристаллов железа. Отличительной особенностью доменной структуры (рис. 3б) является протяженность доменов вдоль направления прокатки. Ширина доменных стенок составляет приблизительно 1–2 мкм. Отчетливо видна также и “рябь” намагниченности, приводящая к дроблению доменов. Дробление доменной структуры приводит к существенному изменению магнитных свойств сплава. На рис. 4 приведены результаты МСМ-исследований фольги  $\text{Fe}_{73}(\text{SiBNb})_{27}$  с добавкой 1% Cu, обработанной 10 импульсами магнитного поля. В отличие от рис. 3, здесь магнитный контраст, отображающий специфическую доменную структуру с зигзагообразными границами, наблюдается на всей исследованной площади фольги. Магнитный контраст на фольге  $\text{Fe}_{73}(\text{SiBNb})_{27}$  с добавкой 1% Cu, обработанной 20 и 30 импульсами магнитного поля, не зарегистрирован.

Обнаруженные изменения доменной структуры аморфных сплавов после их магнитоимпульсной обработки коррелируют с изменением их магнитных свойств. Наиболее заметные изменения наблюдаются для магнитных параметров, связанных с магнитной анизотропией сплавов [18]: коэрцитивной силой, коэффициентом

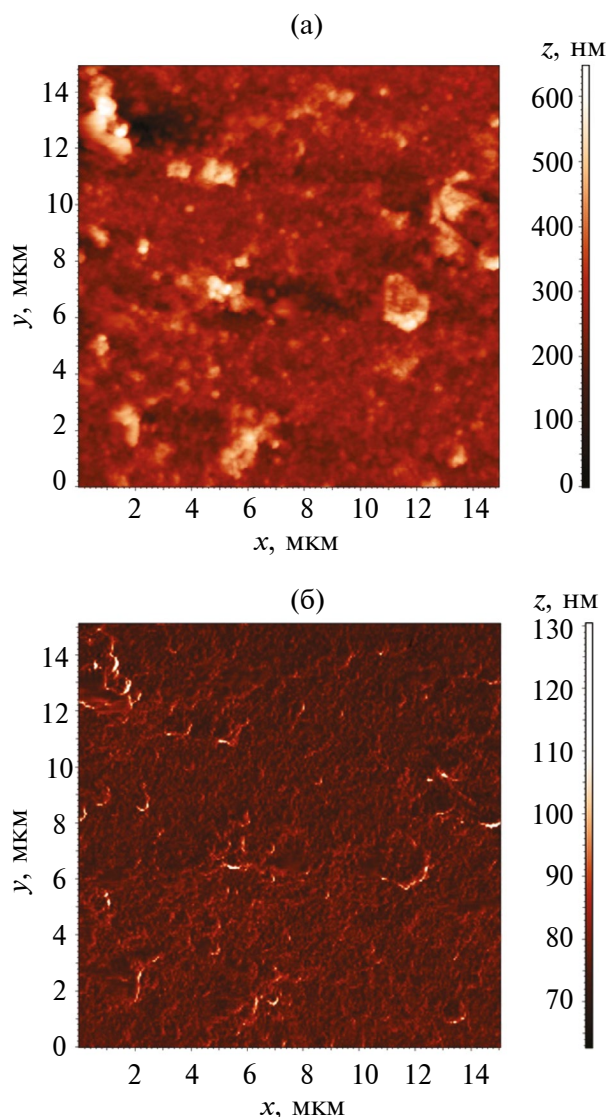
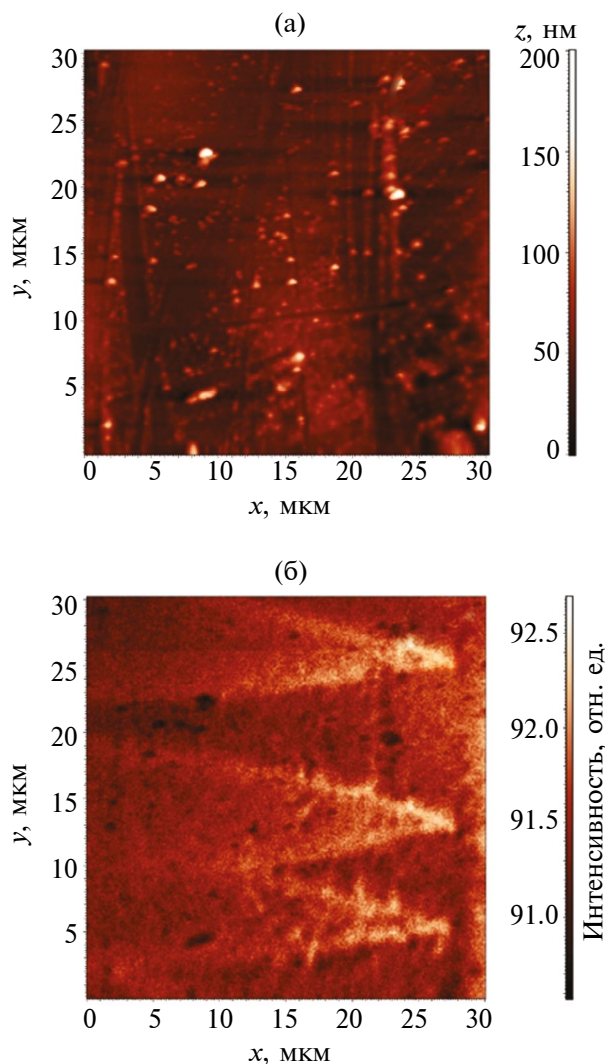
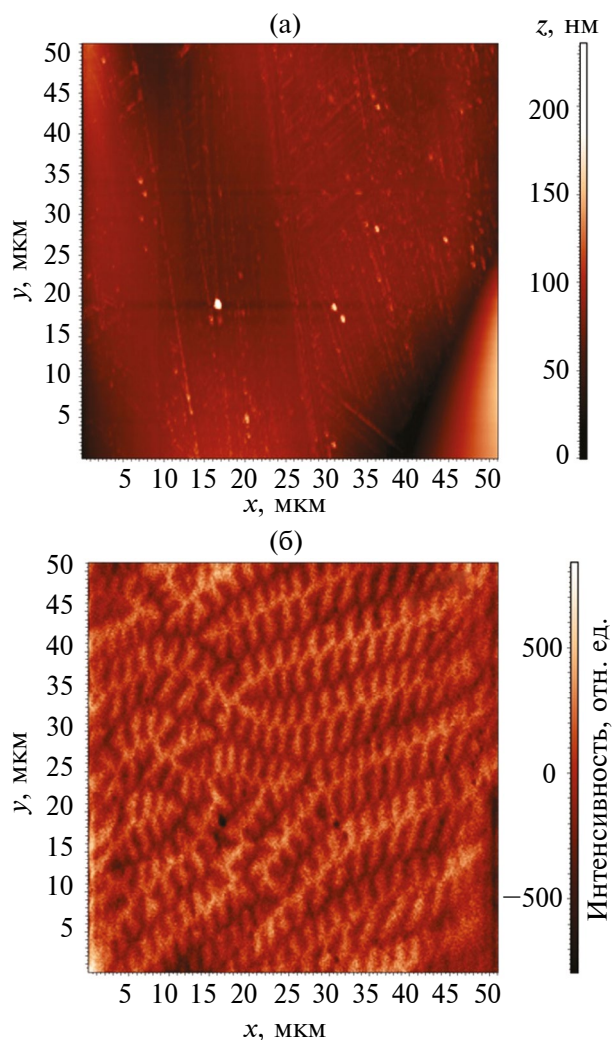


Рис. 2. Изображение участка свободной поверхности ленточного аморфного сплава Fe–Si–B–Nb после воздействия подводной плазмы, полученное с помощью атомно-силовой микроскопии в режиме амплитудного (а) и фазового (б) контраста.

прямоугольности петли магнитного гистерезиса и ее площадью. В качестве примера в табл. 1 и 2 приведены наиболее информативные магнитные параметры сплавов  $\text{Fe}_{73}(\text{SiBNb})_{27}$  после их магнитоимпульсной обработки. Из этих данных видно, что для изученного сплава наиболее существенные изменения в процессе магнитоимпульсной обработки претерпевает коэрцитивная сила (примерно на 17%). В свою очередь, намагниченность насыщения, связанная с локальными магнитными моментами атомов Fe, практически не изменяется. Учитывая тот факт, что коэрцитивная сила в аморфных сплавах связана с усредненной константой анизотропии, размером области упо-



**Рис. 3.** МСМ-изображение участка свободной поверхности ленточного аморфного сплава  $\text{Fe}_{73}(\text{SiNb})_{27}$  с добавкой 1% Cu после магнитоимпульсной обработки 40 импульсами магнитного поля, полученное в режиме амплитудного (а) и фазового (б) контраста.



**Рис. 4.** МСМ-изображение участка свободной поверхности ленточного аморфного сплава  $\text{Fe}_{73}(\text{SiNb})_{27}$  с добавкой 1% Cu после магнитоимпульсной обработки 10 импульсами магнитного поля, полученное в режиме амплитудного (а) и фазового (б) контраста.

рядочения, намагниченности насыщения, можно предположить, что ее изменение в большей степени не обусловлено локальной анизотропией сплава. В меньшей степени это может быть связано с изменением намагниченности насыщения (табл. 2), определяемой топологическим и композиционным ближним порядком. В свою очередь, изменение локальной анизотропии может быть обусловлено как уменьшением напряжений, вызванных неоднородностями рельефа поверхности, отчетливо проявляющимися при исследованиях методами электронной микроскопии, так и изменением анизотропии упорядочения атомов, что сопровождается уменьшением коэффициента прямоугольности (табл. 1). Это находится в соответствии с результатами исследований сплавов

$\text{Fe}_{73}(\text{SiNb})_{27}$  с добавкой 1% Cu. Результаты исследований методами электронной микроскопии показывают, что добавка меди вносит определенный вклад в развитие химической и топологической неоднородности сплава. А на изображениях, полученных с помощью сканирующего зондового микроскопа, отчетливо проявляется упорядоченное распределение областей сжатия, что обеспечено особенностями локализации атомов меди. В результате доменная структура анизотропна, что приводит к затруднению движения доменных границ, проявляющихся на кривые намагничивания. Однако магнитоимпульсная обработка сплава способствует снижению анизотропии, связанной с уменьшением внутренних напряжений и напряжений, обусловленных состоянием поверхности.

**Таблица 1.** Магнитные параметры ленточных аморфных сплавов  $\text{Fe}_{73}(\text{SiBNb})_{27}$  после их магнитоимпульсной обработки

Количество импульсов	0	10	20	30	40
Намагниченность насыщения, А/м <sup>2</sup>	168	168	169	170	170
Коэрцитивная сила, кА/м	4.7	4.6	4.1	4.0	3.9
Коэффициент прямоугольности	0.130	0.131	0.132	0.137	0.131

**Таблица 2.** Магнитные параметры ленточных аморфных сплавов  $\text{Fe}_{73}(\text{SiBNb})_{27} + 1\% \text{ Cu}$  после их магнитоимпульсной обработки

Количество импульсов	0	10	20	30	40
Намагниченность насыщения, А/м <sup>2</sup>	142	142	143	140	140
Коэрцитивная сила, кА/м	3.8	3.8	3.6	3.8	3.7
Коэффициент прямоугольности	0.138	0.137	0.128	0.125	0.113

В результате после магнитоимпульсной обработки сплава наблюдается значительное (до 17%) уменьшение коэрцитивной силы и появление (при малой длительности обработки) специфической доменной структуры, напоминающей структуру отпечатков пальцев [3, 19] (рис. 46). Наличие такой доменной структуры усложняет процесс намагничивания образца, однако увеличение длительности магнитоимпульсной обработки сплава способствует снятию напряжений и трансформации лабиринтной структуры с зигзагообразными доменными границами. Следует отметить, что при магнитоимпульсной обработке ось легкого намагничивания доменов направлена перпендикулярно поверхности ленты, в направлении внешнего магнитного поля.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование методов растровой электронной, оптической и сканирующей зондовой микроскопии в сочетании с измерениями магнитных характеристик позволили провести исследования аморфных сплавов — фольг состава  $\text{Fe}_{73}(\text{SiBNb})_{27}$  и сплавов того же состава с добавкой 1% Cu, полученных методом сверхбыстрого охлаждения расплавленного сплава на вращающемся медном барабане. Установлено, что характер доменной структуры и магнитные свойства аморфного сплава зависят от длительности магнитоимпульсной обработки. Добавка 1% меди в  $\text{Fe}_{73}(\text{SiBNb})_{27}$  влияет на топологическую неоднородность, доменную структуру и изменение коэрцитивной силы сплавов. Изменение коэрцитивной силы и доменной структуры сплавов после магнитоимпульсной обработки связано с релаксацией механических

напряжений, обусловленных особенностями рельефа поверхности, закалочных напряжений и анизотропией упорядочения атомов.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда и Правительства Калужской области, грант № 23-21-10069, <https://rscf.ru/project/23-21-10069/>.

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глезер А.М., Молотилев Б.В. Структура и механические свойства аморфных сплавов. М.: Металлургия, 1992. 207 с.
2. Ильин Н.В., Комогорцев В.С., Крайнова Г.С. Иванов В.А., Ткаченко И.А., Ткачев В.В., Плотников В.С., Исхаков Р.С. // Известия РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 9. С. 1234. <https://www.doi.org/10.31857/S0367676521090143>
3. Aksenov O.I., Abrosimova G.E., Aronin A.S., Orlova N.N., Churyukanova M.N., Zhukova V.A., Zhukov A.P. // J. Appl. Phys. 2017. V. 122. Iss. 23. P. 235103. <https://doi.org/10.1063/1.5008957>
4. Alshits V.I., Darinskaya E.V., Koldaeva M.V., Petrzhik E.A. // Crystallography Rep. 2003. V. 48. № 5. P. 768.
5. Alshits V.I., Darinskaya E.V., Koldaeva M.V., Petrzhik E.A. // JETP Lett. 2016. V. 104. № 5. P. 353. <https://doi.org/10.1134/S0021364016170045>
6. Shipko M.N., Tikhonov A.I., Stepovich M.A., Viryus A.A., Kaminskaya T.P., Korovushkin V.V.,

- Savchenko E.S., Eremin I.V.* // Bull. RAS: Phys. 2018. V. 82. № 8. P. 988.  
<https://www.doi.org/10.3103/S1062873818080373>
7. *Koldaeva M.V., Alshits V.I.* // AIP Adv. 2024. V. 14. № 1. P. 015015.  
<https://doi.org/10.1063/5.0177619>
  8. *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 Conf. Ser.: Mater. Sci. Engineer. 2020. V. 848. P. 012085.  
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/848/1/012085>
  9. *Shipko M.N., Sibirev A.L., Stepovich M.A., Tikhonov A.I., Savchenko E.V.* // J. Surf. Invest. X-ray, Synchrotron Neutron Tech. 2021. V. 15. № 5. P. 970.  
<https://www.doi.org/10.1134/S1027451021050190>
  10. *Shipko M.N., Kaminskaya T.P., Stepovich M.A., Viryus A.A., Tikhonov A.I.* // J. Surf. Invest. X-ray, Synchrotron Neutron Tech. 2023. V. 17. № 1. P. 186.  
<https://www.doi.org/10.1134/S1027451023010378>
  11. *Kaminskaya T.P., Shipko M.N., Stepovich M.A., Tikhonov A.I., Viryus A.A., Popov V.V.* // Bull. RAS: Physics. 2023. V. 87. № 10. P. 1544.  
<https://www.doi.org/10.3103/S1062873823703665>
  12. *Khlyustova A.V., Shipko M.N., Sirotkin N.A., Agafonov A.V., Stepovich M.A.* // Bull. RAS: Physics. 2022. V. 86. № 5. P. 509.  
<https://doi.org/10.3103/S1062873822050100>
  13. *Khlyustova A.V., Sirotkin N.A., Agafonov A.V., Stepovich M.A., Shipko M.N.* // J. Surf. Invest. X-ray, Synchrotron Neutron Tech. 2023. V. 17. № 1. P. 221.  
<https://doi.org/10.1134/S1027451023010305>
  14. *Gupta, P., Gupta A., Shukla A., Ganguli Tapas, Sinha A.K., Principi G., Maddalena A.* // J. Appl. Phys. 2011. V. 110. Iss. 3. P. 033537.  
<https://doi.org/10.1063/1.3622325>
  15. *Миронов В.Л.* Основы сканирующей зондовой микроскопии. Нижний Новгород: Институт физики микроструктур РАН, 2004. 114 с.
  16. *Ernst M., Hug H.J., Roland B.* Scanning Probe Microscopy. The Lab on a Tip. Berlin, Heidelberg: Springer, 2004. 210 p.
  17. *Зайкова В.А., Старцева И.Е., Филиппов Б.Н.* Доменная структура и магнитные свойства электро-технических сталей. М.: Наука, 1992. 272 с.
  18. *Вонсовский С.В.* Магнетизм: Учебное пособие. М.: Наука, 1984. 208 с.
  19. *Hubert A., Schäfer R.* Magnetic Domains. The Analysis of Magnetic Microstructures. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1998, 686 p.

## On the Usage of Underwater Plasma and Magnetopulse Processing of FeSiBNb Amorphous Alloy Ribbons

**M. N. Shipko<sup>1,\*</sup>, M. A. Stepovich<sup>2</sup>, A. V. Khlustova<sup>3</sup>, N. A. Sirotkin<sup>3</sup>, T. P. Kaminskaya<sup>4</sup>,  
 A. V. Stulov<sup>5</sup>, E. S. Savchenko<sup>6</sup>**

<sup>1</sup>*Lenin Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, 153003 Russia*

<sup>2</sup>*Tsiolkovsky Kaluga State University, Kaluga, 248023 Russia*

<sup>3</sup>*G.A. Krestov Institute of Solution Chemistry, Russian Academy of Sciences, Ivanovo, 153045 Russia*

<sup>4</sup>*Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

<sup>5</sup>*LLC “Research and Production Complex “Avtopribor”, Vladimir, 600016 Russia*

<sup>6</sup>*National Research Technological University “MISIS”, Moscow, 119049 Russia*

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

Using the methods of scanning electron, optical and scanning probe microscopy, the surface structure of unannealed amorphous electrotechnical alloys — foils of the composition  $\text{Fe}_{73}(\text{SiBNb})_{27}$  and alloys of the same composition, but with the addition of 1% Cu, obtained by the method of ultra-fast cooling by spraying the melt on a rotating copper drum was studied. On the free surfaces of the foils not adjacent to the rotating drum, microformations, irregularities with “micropoints” with characteristic sizes of less than 0.5 microns were found, which during the operation of electrotechnical products can initiate the presence of electric field gradients on the surface of the foil. The effect of underwater plasma on the studied materials did not lead to a change in their magnetic characteristics. For  $\text{Fe}_{73}(\text{SiBNb})_{27}$  foil with the addition of 1% Cu, treated with 10 and 40 pulses of a weak magnetic field (10–100 kA/m) of low frequency (10–20 Hz), magnetic contrast was detected: in phase contrast mode after exposure to 40 pulses of a magnetic field, triangular figures associated with the appearance of closing prismatic domains, the width of the domain walls of which is approximately 1–2  $\mu\text{m}$ , and after exposure to 10 pulses of a magnetic field — a magnetic contrast of a specific shape, which was observed over the entire studied area of the foil. Also, for  $\text{Fe}_{73}(\text{SiBNb})_{27}$  foil with the addition of 1% Cu, there was a weak dependence of the specific magnetization on the number of magnetic pulses: an increase in the number of pulses led to a slight decrease in the specific magnetization.

**Keywords:** scanning probe microscopy, ribbon amorphous alloys, surface morphology.