

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА

УДК 537.622.4, 537.621.2, 539.213.27

СТРУКТУРА, МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА И МАГНИТНЫЙ ИМПЕДАНС БЫСТРОЗАКАЛЕННЫХ ЛЕНТ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ FINEMET В ИСХОДНОМ СОСТОЯНИИ И ПОСЛЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

© 2020 г. Е. А. Степанова^{a, *}, С. О. Волчков^a, В. А. Лукшина^{a, b}, Д. А. Шишкин^{a, b},
Д. М. Худякова^a, А. Lagrãga^c, Г. В. Курляндская^{a, c}

^aУральский федеральный университет, ул. Мира, 19, Екатеринбург, 620002 Россия

^bИнститут физики металлов УрО РАН, ул. С. Ковалевской, 18, Екатеринбург, 620108 Россия

^cUniversidad del Pais Vasco and BCMaterials UPV-EHU, Leioa, 48940 Spain

*e-mail: elena.stepanova@urfu.ru

Поступила в редакцию 17.04.2020 г.

После доработки 16.05.2020 г.

Принята к публикации 19.05.2020 г.

Проведено исследование влияния термической обработки (ТО) на особенности структуры, магнитные свойства и магнитный импеданс быстрозакаленных лент состава $\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Nb}_3\text{Cu}_1$ и легированных лент, в которых 10 вес. % железа замещено либо кобальтом, либо никелем, либо марганцем. Ленты с кобальтом в результате ТО при постоянной температуре продемонстрировали существенное увеличение значения максимальной магнитной индукции. Магнитные и магнитоимпедансные свойства, исследованные в широком диапазоне частот переменного тока от 1 до 400 МГц, показали существенное изменение особенностей эффективной магнитной анизотропии и высокочастотных откликов в результате ТО. Сравнительный анализ результатов, полученных на образцах различного состава, может быть полезен как для понимания особенностей формирования эффективной магнитной анизотропии нанокристаллических сплавов, так и с точки зрения практических приложений при поиске оптимальных физико-химических параметров материалов для датчиков малых магнитных полей.

Ключевые слова: нанокристаллические магнитомягкие сплавы, термообработка, кривые намагничивания, магнитный импеданс

DOI: 10.31857/S0015323020090089

ВВЕДЕНИЕ

Аморфные и нанокристаллические ленты быстрозакаленных магнитомягких сплавов обладают уникальным сочетанием физических и химических свойств [1–3], что способствует их использованию в различных приложениях, таких как датчики слабых магнитных полей (от неразрушающего контроля и датчиков позиционирования до биосенсоров), в качестве материала сердечников высокочастотных трансформаторов, магнитных экранов и др. [3, 4]. В настоящее время исследуемые ленты нашли свое применение в качестве сенсоров малых магнитных полей, где используется эффект магнитного импеданса (МИ) [4, 5], состоящий в изменении полного импеданса ферромагнитного проводника при приложении магнитного поля и протекании высокочастотного тока возбуждения [4]. Несмотря на то, что магнитные ленты, проволоки и тонкие пленки состава $\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Nb}_3\text{Cu}_1$ (FM) широко представлены в литературе как в исходном аморфном состоянии, так и после про-

текания процесса нанокристаллизации в различных режимах [6], магнитные свойства легированных сплавов и особенности МИ-эффекта в таких структурах исследованы в меньшей степени. Особенно это касается сравнительного анализа легированных нанокристаллических лент, подвергнутых обработке в одинаковых условиях и исследованных совместно. Некоторые аспекты (температурная зависимость магнитной восприимчивости) структурных превращений были рассмотрены для лент классического состава FM [7], а также лент, легированных кобальтом, никелем и марганцем. Отмечено, что ленты с 10% марганца демонстрируют наилучшие МИ свойства в исходном аморфном состоянии без дополнительного термического воздействия. Однако для получения высоких значений динамической магнитной проницаемости и чувствительности МИ к внешнему магнитному полю часто необходим переход в нанокристаллическое состояние [8], который может происходить в результате термических обработок. Легирование

аморфного сплава типа FeSiBNbCu может сказаться на его структуре, электросопротивлении и магнитных характеристиках, и магнитной анизотропии [7–10].

В данной работе была поставлена задача провести сравнительное исследование влияния термической обработки (ТО) на структуру, магнитные свойства и магнитный импеданс быстрозакаленных лент типа FINEMET одинаковой геометрии с легирующими добавками либо кобальта, либо никеля, либо марганца.

МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТА

Аморфные ленты следующих составов были получены методом быстрой закалки из расплава на вращающийся медный барабан: Fe_{73.5}Si_{13.5}B₉Nb₃Cu₁ (FM); Fe_{63.5}Co₁₀Si_{13.5}B₉Nb₃Cu₁ (FM–Co); Fe_{63.5}Ni₁₀Si_{13.5}B₉Nb₃Cu₁ (FM–Ni); Fe_{63.5}Mn₁₀Si_{13.5}B₉Nb₃Cu₁ (FM–Mn). Геометрические размеры образцов менялись в зависимости от типа проводимых исследований. Так, для структурных исследований с помощью рентгенофазового анализа использовали образцы 10 × 2 × 0.025 мм, для магнитных измерений в пермеатре – 110 × 2 × 0.025 мм, для измерения температурной зависимости магнитной восприимчивости – 4 × 2 × 0.025 мм, и для измерений высокочастотного магнитного импеданса – 45 × 2 × 0.025 мм.

На установке для измерения магнитной восприимчивости в переменном магнитном поле амплитудой 8 кА/м были получены зависимости, представленные на рис. 1. На основе анализа этой зависимости (рис. 1) температура 530°C была выбрана единой для ТО всех исследуемых материалов. Для проведения ТО ленты помещались в металлический держатель для однородного нагрева образцов и предотвращения их изгиба. ТО проводили на воздухе, в печи МИМП-3УЭ: скорость нагрева – 10°C/мин до температуры 530°C; время изотермической выдержки – 60 мин.

Структура образцов всех сплавов как в исходном состоянии, так и после ТО исследовалась с помощью метода рентгенофазового (XRD) анализа на дифрактометре Bruker D8 с использованием излучения медной трубки ($\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$) при силе тока 20 мА и рабочем напряжении 30 кВ.

Образцы монтировались на кремниевой платформе с нулевым базовым сигналом. Размер кристаллитов определялся по стандартной методике Шеррера путем оценки ширины дифракционного пика (110), соответствующего ОЦК-фазе Fe(Si).

Основные кривые намагничивания и петли магнитного гистерезиса были исследованы на измерительно-вычислительном комплексе ММКС 100-05 производства НИИ СТТ (г. Смоленск) с погрешностью, не превышающей 3%.

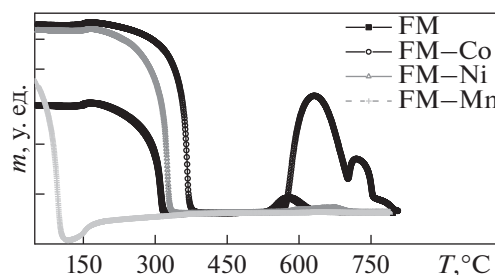


Рис. 1. Температурная зависимость магнитной восприимчивости исследуемых быстрозакаленных лент различных составов, измеренная в переменном магнитном поле амплитудой 8 кА/м [8].

Комплексный импеданс ($Z = R + iX$, где R – действительная часть, X – мнимая часть полного импеданса, i – мнимая единица) измерялся как функция внешнего магнитного поля, приложенного вдоль длинной стороны ленты в направлении протекания электрического тока высокой частоты (от 1 до 400 МГц). Для измерения магнитного импеданса образцы в виде лент крепились на специальные держатели, составляя часть линии “микрострайп”. Для выделения вклада образца, расчета той части импеданса, которая соответствует импедансу собственно образца, использовалась стандартная процедура калибровки, описанная ранее [11]. Коэффициент отражения S_{11} , на основе результатов измерения которого рассчитывали величины полного импеданса и его компонент, определялся с помощью анализатора цепей Agilent E4991A. Для удобства представления зависимости МИ от внешнего магнитного поля (H) использовалось МИ-отношение

$$\Delta Z/Z = 100 \times (Z(H) - Z(H_{\max})) / Z(H_{\max}), \quad (1)$$

где $H_{\max} = 8000 \text{ А/м}$. Кроме того, были получены и проанализированы частотные зависимости максимального значения МИ-отношения $\Delta Z/Z_{\max}$, последний параметр – это максимальное значение МИ-отношения, рассчитанного для каждой конкретной частоты тока возбуждения. Для практических приложений бывает полезен такой МИ-параметр, отражающий максимальную величину магнитной проницаемости, как чувствительность МИ к внешнему магнитному полю: $S(\Delta Z/Z) = \Delta Z/Z/\Delta H$, где $\Delta H = 8 \text{ А/м}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ рентгеновских спектров показал, что в исходном состоянии (рис. 2а) все исследуемые ленты находились в рентгеноаморфном состоянии. При ТО лент без легирования (FM), а также лент, легированных кобальтом (FM–Co) и никелем (FM–Ni) с замещением 10% железа, проходит процесс нанокристаллизации с образованием кри-

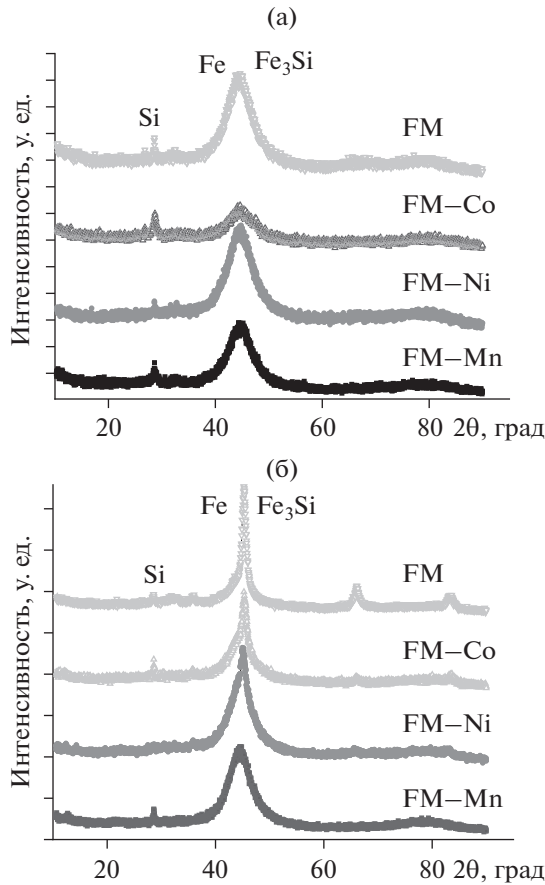


Рис. 2. XRD-спектры исследуемых быстрозакаленных лент: а – исходное состояние; б – состояние после термической обработки.

сталлитов фазы Fe_3Si , равномерно распределенных в аморфной матрице. Средний размер кристаллитов во всех случаях составляет 10 ± 3 нм. В лентах с замещением 10% железа марганцем (FM–Mn) при использованной ТО процесс первичной рекристаллизации не начинается, образцы не претерпевают значительных структурных изменений и остаются рентгеноаморфными (рис. 2б) при среднем размере кристаллитов менее 2 нм. Отдельно следует отметить, что XRD-анализ указывает на присутствие очень незначительного количества оксида железа Fe_2O_3 на поверхности отожженных лент вследствие проведения обработки на воздухе.

Основные кривые намагничивания лент как в исходном состоянии, так и после термического воздействия представлены на рис. 3. Видно, что кривая намагничивания образца FM–Mn после ТО изменяется незначительно, что можно объяснить отсутствием существенных структурных изменений в результате ТО. В противоположность легированию марганцем, для образца FM–Co характерно существенное увеличение максималь-

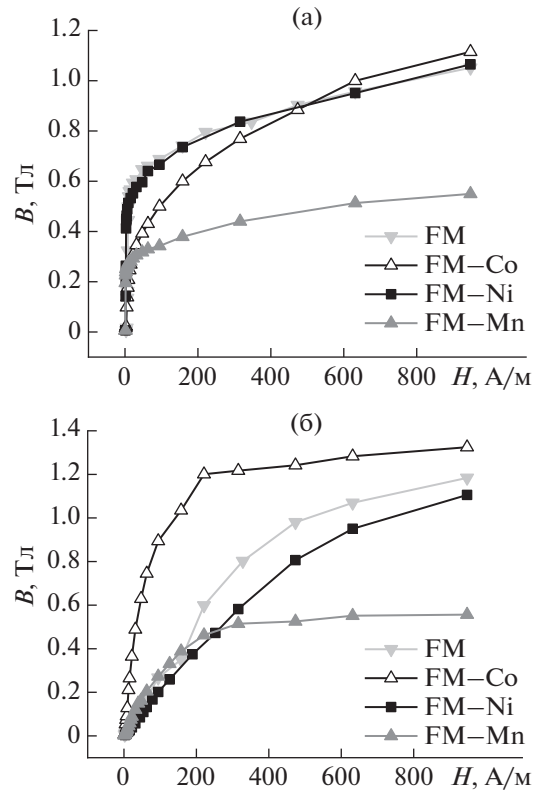


Рис. 3. Основные кривые намагничивания быстрозакаленных лент различных составов: а – исходное состояние, б – после ТО.

ной индукции в результате ТО. Изменения кривых намагничивания лент классического состава и лент, легированных никелем, указывают на то, что в особенности в области малых полей, выбранный режим ТО не приводит к улучшению статических свойств.

Проанализируем особенности петель гистерезиса лент в исходном состоянии и после проведения ТО (рис. 4). Для удобства сравнения все петли гистерезиса представлены в одной и той же шкале. В случае лент классического состава, как и для образцов FM–Ni, существенно понижается остаточная индукция (B_r) (рис. 3а). Для образца FM–Ni увеличивается коэрцитивная сила (H_c) (рис. 3в). Для образца FM–Mn наблюдается увеличение B_r и уменьшение H_c (рис. 3г). Наиболее интересные изменения в результате ТО наблюдали в случае образцов FM–Co (рис. 3б). Наряду с заметным увеличением максимальной индукции, увеличения остаточной индукции не наблюдается. Такое изменение формы петли гистерезиса свидетельствует об усилении роли процессов вращения векторов спонтанной намагниченности. Несмотря на то, что полученные результаты показали неоптимальность режима ТО для исследуемых лент, в настоящем исследовании ставилась задача

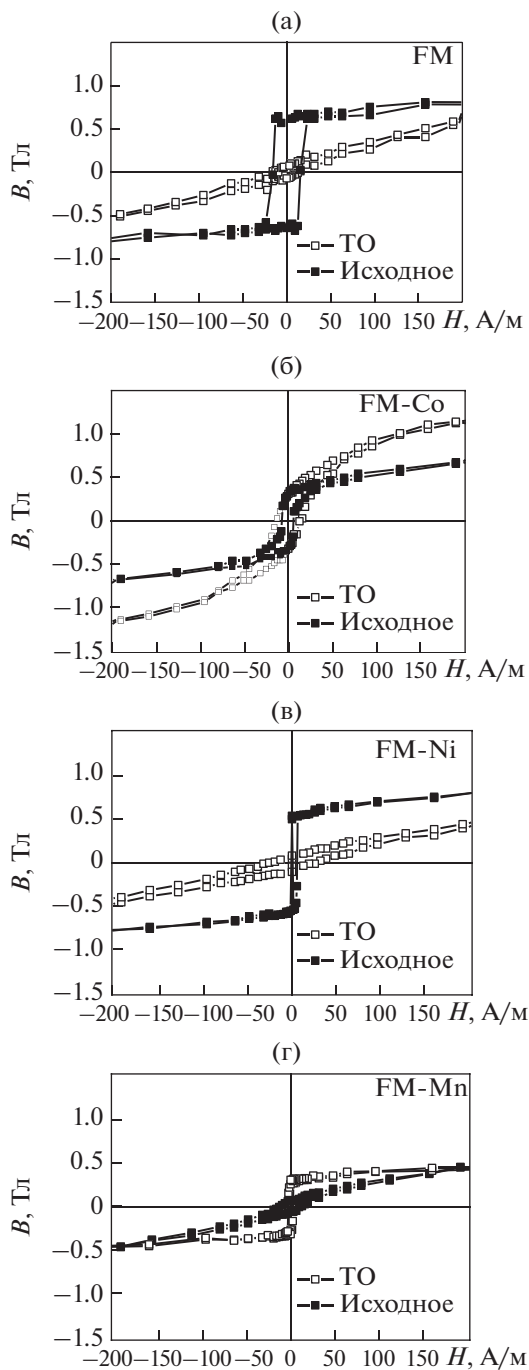


Рис. 4. Петли гистерезиса быстрозакаленных лент различных составов до и после ТО: а – FM; б – FM–Co; в – FM–Ni; г – FM–Mn.

именно сравнительного анализа свойств различных материалов после одинаковых режимов ТО.

МИ-эффект часто используют в качестве методики исследования особенностей эффективной магнитной анизотропии. На рис. 5а представлены частотные зависимости МИ отношения для всех типов быстрозакаленных лент в исход-

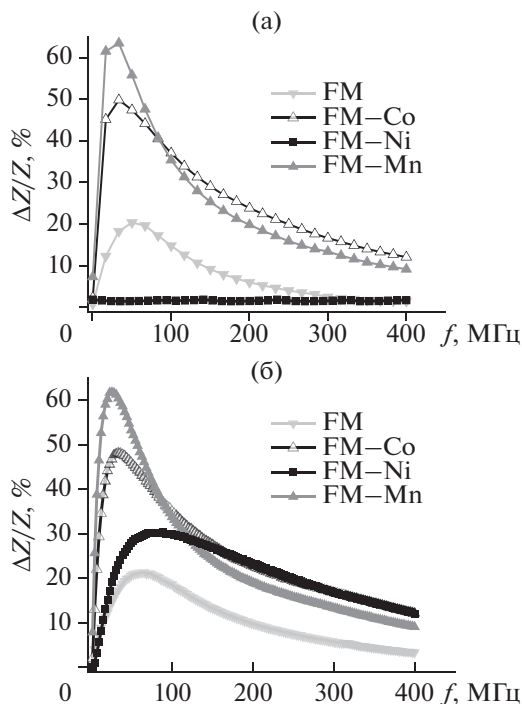


Рис. 5. Частотная зависимость максимального МИ-отношения $\Delta Z/Z_{\max}$ быстрозакаленных лент различных составов до (а) и после (б) ТО.

ном состоянии, а на рис. 5б – после ТО. МИ свойства исследованных лент существенно меняются в зависимости от состояния и состава образцов. Наибольшее значение $\Delta Z/Z_{\max} \approx 65\%$ как в исходном состоянии, так и после ТО наблюдается на частоте $f \approx 25$ МГц для образцов, легированных марганцем. Подобное же поведение, но при $\Delta Z/Z_{\max} \approx 50\%$ как в исходном состоянии, так и после ТО наблюдается на частоте $f \approx 30$ МГц для образцов, легированных кобальтом. Для образцов без легирования $\Delta Z/Z_{\max} \approx 22\%$ в исходном состоянии и после ТО при $f \approx 65$ МГц.

Следует отметить, что небольшая тенденция к смещению в область малых частот пиков кривых $\Delta Z/Z_{\max}$ для образцов FM, FM–Co и FM–Ni отражает существование процесса релаксации, снижения уровня закалочных напряжений в закаленном аморфном материале в результате ТО, даже в том случае, если этот процесс не сопровождается кристаллизацией (рис. 5б).

Частотные зависимости $\Delta Z/Z_{\max}(f)$ для лент с добавками никеля сильно отличаются в состояниях до и после ТО. Следует отметить, что именно для сплава, легированного никелем, после ТО наблюдается заметный рост величины до $\Delta Z/Z_{\max} \approx 32\%$ на частотах $f \approx 80\text{--}100$ МГц. Очень низкая величина МИ-отношения в исходном состоянии для лент FM–Ni объясняется их высоким электрическим сопротивлением.

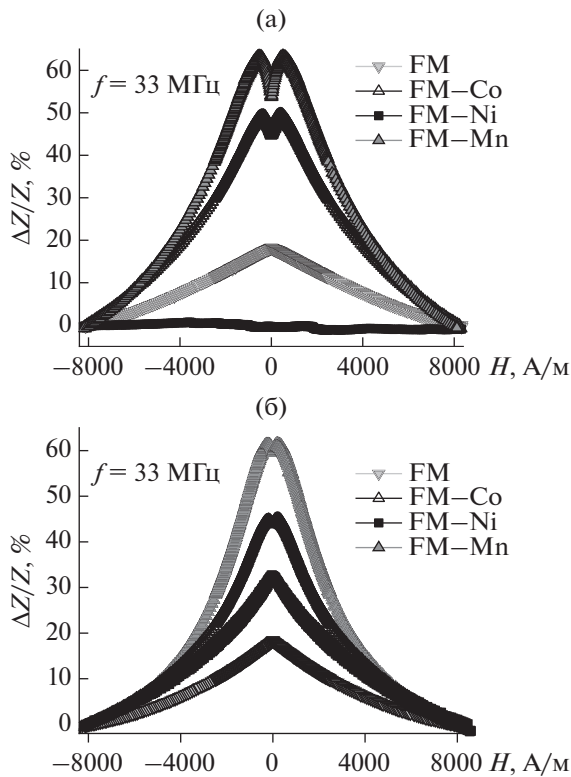


Рис. 6. Полевая зависимость МИ отношения $\Delta Z/Z$ лент различных составов до (а) и после (б) ТО при фиксированной частоте $f = 33$ МГц.

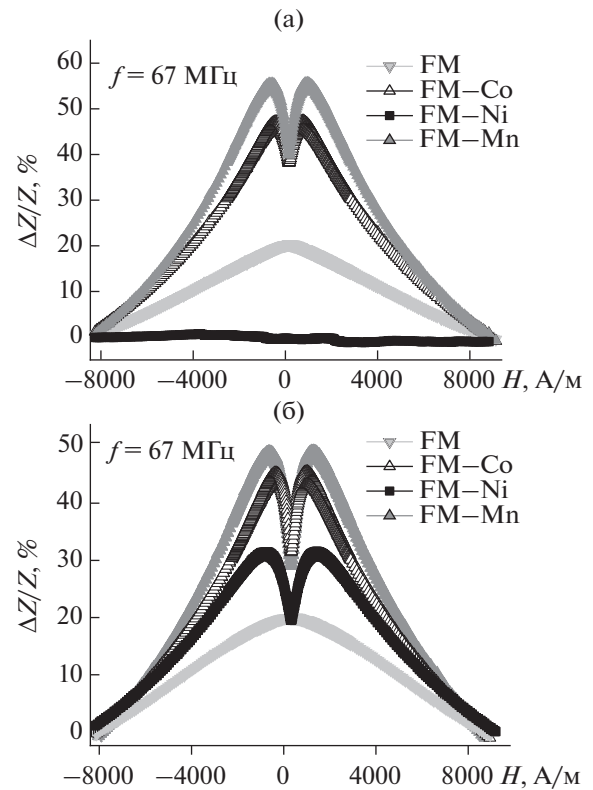


Рис. 7. Полевая зависимость МИ отношения $\Delta Z/Z$ лент различных составов до (а) и после (б) ТО при фиксированной частоте $f = 67$ МГц.

Рассмотрим полевую зависимость МИ для частоты $f = 33$ МГц (рис. 6а). Она соответствует интервалу частот, следующему сразу после максимума МИ-отношения. Следует отметить, что общий вид полевых зависимостей МИ для образцов без легирования и образцов, легированных кобальтом или марганцем, соответствует кривым типа “один пик”. Однако для образцов FM–Co и FM–Mn в малых полях наблюдается небольшое расщепление основного пика на два пика (в полях, близких к полю анизотропии (рис. 4)). МИ-кривые типа “один пик” характерны для образцов с продольной эффективной магнитной анизотропией [12], что вполне согласуется с особенностями анизотропии магнетиков, полученных методом быстрой закалки.

Кроме того, наличие двух небольших пиков в полях, близких к полю анизотропии, часто связывают с вкладом поверхностной магнитной анизотропии [13] и особенностями, связанными как с шероховатостью поверхности, так и с отличием условий охлаждения поверхностного слоя от условий охлаждения основного объема материала (рис. 6б). Сделанные ранее оценки показывают, что подобная неоднородность может иметь толщину до 3–4 мкм с каждой поверхности [13].

Далее рассмотрим полевую зависимость МИ-отношения для частоты тока возбуждения $f = 67$ МГц (рис. 7а, 7б), при которой для образцов всех составов максимум кривой $\Delta Z/Z_{\max}(f)$ уже пройден.

Качественно зависимости $\Delta Z/Z(H)$ в исходном состоянии очень похожи для частот 33 и 67 МГц при несколько меньших значениях МИ отношения в области высоких частот. Однако формы МИ кривых для отожженных лент, легированных кобальтом или марганцем, очень близки, а для лент без легирования и образцов, легированных никелем, точно соответствуют кривым типа “один пик”. Это еще раз подтверждает предположение о релаксации закалочных напряжений в процессе ТО. Трансформация пика $\Delta Z/Z(H)$ в кривую с ярко выраженным раздвоением основного пика (рис. 7а) при более высоких частотах неудивительно. Подобное поведение не раз обсуждалось в литературе [2, 11]. МИ-эффект хорошо описывается в рамках классической электродинамики на основе скин-эффекта [2]. Для случая быстрозакаленной ленты глубина скин-слоя δ может быть оценена как

$$\delta = (2\rho/(\omega\mu_0))^{1/2}, \quad (2)$$

где ρ – электрическое сопротивление при постоянном токе, $\omega = 2\pi f$ – круговая частота тока возбуждения, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ – магнитная проницае-

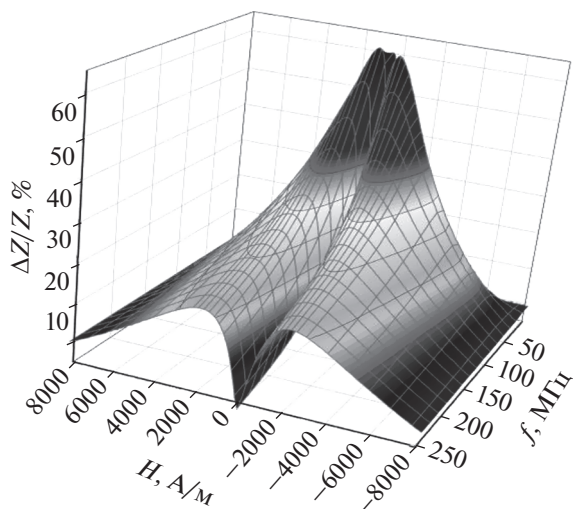


Рис. 8. Частотно-полевая зависимость МИ отношения $\Delta Z/Z$ быстрозакаленных лент FM–Mn после ТО.

мость вакуума и μ — динамическая магнитная проницаемость. Поскольку величина магнитной проницаемости меняется в зависимости от напряженности приложенного поля, а полный импеданс зависит от величины скин-слоя, то в конечном итоге величина импеданса может сильно зависеть от величины внешнего поля: $Z = Z(\delta(\mu(H)))$. Для частот 33 и 67 МГц в исходном состоянии величины $\delta(f = 33 \text{ МГц}) \approx 8.3 \text{ мкм}$ и $\delta(f = 67 \text{ МГц}) \approx 5.8 \text{ мкм}$, если принять величины $\rho = 200 \text{ мкОм} \times \text{см}$ и $\mu = 200$. При толщине образца в 25 мкм при $f = 33 \text{ МГц}$ зона поверхностного слоя составляет примерно 70% скин-слоя, а при $f = 67 \text{ МГц}$ зона поверхностного слоя составляет уже около 50% скин-слоя, т.е. роль поверхностного слоя увеличивается при возрастании частоты. Наблюдаемое поведение $\Delta Z/Z(H)$ вполне согласуется с имеющимися представлениями при предположении существования сильного скин-эффекта. ТО в выбранном режиме приводит к резкому снижению электрического сопротивления и изменению величины магнитной проницаемости, и уменьшению зоны неоднородности поверхностного слоя до 1–2 мкм. Для частот 33 и 67 МГц после ТО величины $\delta(f = 33 \text{ МГц}) \approx 3 \text{ мкм}$ и $\delta(f = 67 \text{ МГц}) \approx 2 \text{ мкм}$, если принять величины $\rho = 20 \text{ мкОм} \times \text{см}$ и $\mu = 150$. В этом случае зона поверхностного слоя составляет 25% скин-слоя при $f = 33 \text{ МГц}$, а при $f = 67 \text{ МГц}$ она составляет около 15% скин-слоя. При этом, если при низких частотах область протекания тока возбуждения захватывает как приповерхностную, так и объемные зоны образцов, то при повышенных частотах доля захваченных объемных областей существенно уменьшается, что вполне согласуется с наблюдаемым увеличением провала в интервале малых частот на кривых $\Delta Z/Z(H)$. Следует отметить интересное поведение образцов

FM–Ni. В исходном состоянии МИ-эффект в них на всех исследованных частотах был близким к нулю. Однако предложенная ТО привела к протеканию процесса первичной кристаллизации и к заметному увеличению максимума МИ отношения (до почти 35% при $f = 33$ и 67 МГц) (рис. 6б, 7б).

Отдельно отметим, что наиболее важная характеристика МИ эффекта с точки зрения приложений, чувствительность $S(\Delta Z/Z)$, оказалась для лент FM–Mn после ТО примерно в полтора раза выше, чем для классического сплава FM. Рассмотрим результаты исследования МИ-лент сплава FM–Mn. Анализ полевых зависимостей $\Delta Z/Z(H)$ показывает, что именно ленты данного типа демонстрируют наилучшие МИ-характеристики как в исходном состоянии, так и после выбранной ТО. Рисунки 6а, 6б, 7а, 7б позволяют сравнить чувствительности $S(\Delta Z/Z) = 0.008$ и $0.013\%/A/m$ для неотожженных и ТО лент соответственно. Широкий интервал полей с почти линейным откликом $\Delta Z/Z(H)$ делает данный материал интересным для сенсорных приложений.

Использование более высоких частот в данном случае нелогично, так как это приводит к раздвоению пика и смещению линейного интервала в область более высоких полей, менее удобных для приложений. При этом на высоких частотах происходит заметное расширение линейного интервала: для FM–Mn после ТО он составляет от 1000 до 6000 А/м при $S(\Delta Z/Z) = 0.009\%/A/m$.

Современные автоматизированные системы измерения полного импеданса позволяют получать большой набор экспериментальных данных, анализ которых может быть полезен как для оценки особенностей эффективной магнитной анизотропии, наличия магнитных фазовых переходов, степени однородности материала, так и для определения важных функциональных интервалов для практического использования в сенсорных приложениях. В качестве примера приведем набор параметрических кривых, описывающих полевые и частотные зависимости $\Delta Z/Z$ для лент FM–Mn после ТО (рис. 8).

Видно расширение линейного интервала зависимости $\Delta Z/Z(H)$ при увеличении частоты, сопровождающееся, заметным снижением чувствительности МИ к внешнему магнитному полю. Кроме того, очевидная трансформация общей формы МИ кривой приводит к тому, что чувствительность $S(\Delta Z/Z)$ в интервале полей до 1500 А/м оказывается заметно выше, чем в интервале полей от 2000 до 7000 А/м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено сравнительное исследование влияния термического воздействия при постоянной температуре на структуру, магнитные свойства и

магнитный импеданс лент $\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Nb}_3\text{Cu}_1$, $\text{Fe}_{63.5}\text{Co}_{10}\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Nb}_3\text{Cu}_1$, $\text{Fe}_{63.5}\text{Ni}_{10}\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Nb}_3\text{Cu}_1$ и $\text{Fe}_{63.5}\text{Mn}_{10}\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Nb}_3\text{Cu}_1$ одинаковой геометрии.

В исходном состоянии все образцы были рентгеноаморфны, а при ТО лент без легирования, а также лент, легированных кобальтом и никелем с замещением 10% железа, проходит процесс кристаллизации с образованием кристаллитов фазы Fe_3Si , средний размер которых во всех случаях составляет 10 ± 3 нм. Особенности изменения магнитных свойств зависят от состава образцов. Так, например, для лент FM и FM–Ni понижается остаточная индукция, для лент FM–Ni увеличивается коэрцитивная сила, а для лент FM–Mn коэрцитивная сила уменьшается.

Наибольшее значение $\Delta Z/Z_{\text{max}} \approx 65\%$ в исходном состоянии и после ТО наблюдается на частоте $f \approx 25$ МГц для образцов, легированных марганцем. Подобное поведение, но при $\Delta Z/Z_{\text{max}} \approx 50\%$ в исходном состоянии и после ТО, наблюдается при $f \approx 30$ МГц для образцов, легированных кобальтом. Для образцов FM–Ni МИ эффект в исходном состоянии на всех исследованных частотах был близким к нулю, но предложенная ТО привела к кристаллизации и к увеличению максимума МИ (35% при $f = 33$ и 67 МГц). Наиболее важная характеристика с точки зрения его приложений, чувствительность по отношению к внешнему магнитному полю, оказалась для лент FM–Mn после ТО примерно в полтора раза выше, чем для лент нелегированного сплава FM. Ленты FM–Mn демонстрируют наилучшие МИ характеристики: чувствительности $S(\Delta Z/Z) = 0.008$ и $0.013\%/A/m$ для неотожженных и ТО лент соответственно. На высоких частотах происходит заметное расширение линейного интервала: для FM–Mn после ТО он составляет от 1000 до 6000 A/m при $S(\Delta Z/Z) = 0.009\%/A/m$.

Авторы выражают благодарность Д.С. Незнахину за проведенные температурные исследования магнитной восприимчивости.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта MAT2017-83631-C3-R (Испания) и гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации FEUZ-2020-0051.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mushnikov N.V., Potapov A.P., Shishkin D.A., Protasov A.V., Golovnya O.A., Shchegoleva N.N., Gaviko V.S., Shunyayev K.Y., Bykov V.A., Starodubtsev Y.N., Belozеров V.Y.* Magnetic properties and structure of nanocrystalline FINEMET alloys with various iron contents // *Phys. Met. Metal.* 2015. V. 116. № 7. P. 663–670.
2. *Derevyanko M.S., Bukreev D.A., Moiseev A.A., Kurlyandskaya G.V., Semirov A.V.* Effect of heat treatment on the magnetoimpedance of soft magnetic $\text{Co}_{68.5}\text{Fe}_4\text{Si}_{15}\text{B}_{12.5}$ Amorphous Ribbons // *Phys. Met. Metal.* 2020. V. 121. № 1. P. 28–31.
3. *Skulkina N.A., Ivanov O.A., Mazeeva A.K., Kuznetsov P.A., Chekis V.I., Denisov N.D.* Conditions for the Formation of a Polymeric Coating and the Magnetic Properties of Cobalt-Based Amorphous Alloys // *Phys. Met. Metallogr.* 2018. V. 119. № 12. P. 1154–1161.
4. *Semirov A.V., Derevyanko M.S., Bukreev D.A., Moiseev A.A., Kurlyandskaya G.V.* High frequency impedance of cobalt-based soft magnetic amorphous ribbons near the Curie temperature // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics.* 2014. V. 78(2). P. 81–84.
5. *Beach R.S. and Berkowitz A.E.* Giant magnetic field dependent impedance of amorphous FeCoSiB wire // *Appl. Phys. Lett.* 1994. V. 64. P. 3652.
6. *Makhotkin V.E., Shurukhin B.P., Lopatin V.A., Marchukov P.Y., Levin Y.K.* Magnetic field sensors based on amorphous ribbons // *Sens. Actuators.* 1991. V. A 27. P. 759–762.
7. *Celegato F., Coisson M., Tiberto P., Vinai F., Baricco M.* Effect of crystallisation on the magnetic properties of FeCuNbBSi amorphous thin films produced by sputtering // *Phys. Status Sol. C.* 2011. V. 8. P. 3070–3073.
8. *Stepanova E.A., Volchkov S.O., Lukshina V.A., Khudyakova D.M., Larrañaga A., Neznakhin D.S.* Magnetic and magnetoimpedance properties of rapidly quenched ribbons of modified alloys based on FINEMET // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2019. V. 1389. P. 012123.
9. *Franco V., Conde C.F., Condea A., Kiss L.F., Kaptas D., Kemeny T., Vincze I.* Dipole–dipole interaction in superparamagnetic nanocrystalline $\text{Fe}_{63.5}\text{Cr}_{10}\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Cu}_1\text{Nb}_3$ // *J. Appl. Phys.* 2001. V. 90. P. 1558.
10. *Serikov V.V., Kleinerman N.M., Volkova E.G., Lukshina V.A., Potapov A.P., Svalov A.V.* Structure and magnetic properties of nanocrystalline FeCuNbSiB alloys after a thermomechanical treatment // *Phys. Met. Metal.* 2006. V. 102. P. 268–273.
11. *Agudo P., Vázquez M.* Influence of Ni on structural and magnetic properties of $\text{Fe}_{73.5-x}\text{Ni}_x\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Nb}_3\text{Cu}_1$ ($0 < x < 25$) alloys // *J. Appl. Phys.* 2005. V. 97. P. 023901.
12. *Kurlyandskaya G.V., de Cos D., Volchkov S.O.* Magneto-sensitive transducers for nondestructive testing operating on the basis of the giant magnetoimpedance effect: A review // *J. Nondestruct. Test. (Russ.)* 2009. V. 45. № 6. P. 377–348.
13. *Saad A., Garcia J.A., Kurlyandskaya G., Santos J. D., Elbaile L.* Influence of residual stresses and their relaxation on giant magnetoimpedance of CoFeSiB metallic glasses // *Japan. J. Appl. Phys.* 2005. V. 44. № 7A. P. 4939–4944.