ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТОУПРУГИХ СВОЙСТВ АМОРФНО-КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО СПЛАВА $\text{Fe}_{73.7}\text{Cu}_{1.0}\text{Nb}_{3.2}\text{Si}_{12.7}\text{B}_{9.4}$ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

ФЕДОРОВА Н. В., ЛЕНЬКОВ С.В.

Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения РАН,
426067, г. Ижевск, ул. Т. Барамзиной, 34

АННОТАЦИЯ. На примере аморфных лент сплава $\text{Fe}_{73.7}\text{Cu}_{1.0}\text{Nb}_{3.2}\text{Si}_{12.7}\text{B}_{9.4}$ показано влияние процессов нанокристаллизации на магнитоупругое затухание. Анализ внутреннего трения показал существенный вклад гистерезисной составляющей и вклад от микровихревых токов. Измерения магнитоупругих свойств проводились методом электромагнитно-акустического преобразования. При обработке экспериментальных данных использовалась математическая модель, описывающая распространение упругой волны в ленте с большим затуханием. Использование АЦП и оригинального программного обеспечения позволило уменьшить систематическую ошибку эксперимента.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: магнитоупругое затухание, модуль Юнга, аморфные магнитные ленты, нанокристаллизация, электромагнитно-акустическое преобразование, систематическая ошибка.

ВВЕДЕНИЕ

Аморфные магнитные материалы, подвергнутые температурному отжигу, относятся к перспективным благодаря наличию у них хороших магнитных и магнитоупругих свойств. В основе изменений свойств в процессе отжига лежит появление наноразмерных структур и, как следствие, возникновение многочисленных межфазных границ между аморфной и нанокристаллической фазами. Внутренние напряжения, возникающие между аморфной и нанокристаллической фазами приводят к перестройке магнитной доменной структуры и существенному изменению свойств под влиянием кристаллизационного отжига.

Изучение магнитных и магнитоупругих свойств аморфных сплавов, подвергнутых различным внешним воздействиям не теряет своей актуальности до настоящего времени [1 – 3]. Для контроля их магнитных свойств используются те же методы, что и для объемных образцов, измерение же магнитоупругих свойств магнитных сплавов в виде лент с аморфно-кристаллической структурой представляет определенные трудности. В аморфных материалах на основе Fe, для которых характерна достаточно большая магнитострикция, эти трудности частично могут быть разрешены развитием теории и методологии электромагнитно-акустического (ЭМА) преобразования применительно к тонким лентам [4 – 6]. Этот метод позволяет изучить влияние нанокристаллизации на модуль Юнга и внутренне трение.

Внутреннее трение представляет собой весьма структурно-чувствительный метод. Так в работах [7, 8] исследовалось влияние эволюции структуры аморфных сплавов системы Fe-P-Si и аморфного сплава $\text{Mg}_{84}\text{Ni}_{12.5}\text{Y}_{3.5}$ (релаксация внутренних напряжений, расстеклование, зарождение и распад нанокристаллических фаз) при их нагреве на внутреннее трение. Обнаружены необратимые пики внутреннего трения, положение которых коррелирует с характеристическими температурами перестройки структуры. Исследование внутреннего трения в аморфных и нанокристаллических магнитных сплавах показало, что с физической точки зрения в них реализуются те же механизмы затухания, что и в кристаллических ферромагнетиках.

В представленной работе на примере аморфного сплава $\text{Fe}_{73.7}\text{Cu}_{1.0}\text{Nb}_{3.2}\text{Si}_{12.7}\text{B}_{9.4}$ исследовано влияние процессов нанокристаллизации на внутреннее трение. Показаны пути решения трудностей измерения, связанных со свойствами исследуемых материалов.

ЭКСПЕРИМЕНТ. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Измерение модуля Юнга и внутреннего трения аморфных лент на основе железа проводилось посредством измерения информативных параметров двойного ЭМА-преобразования в резонансном режиме [9].

Блок-схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Опорная пластина с образцом ($L = 40$ мм) помещалась в продольное магнитное поле H_0 (поле поляризации). Генерация и прием сигнала ЭМАП осуществлялись проходными катушками индуктивности с шириной намотки 5 мм. При такой геометрии эксперимента в образцах возбуждается нулевая мода Лэмба [10]. Между катушками индуктивности устанавливался экран из медной фольги с целью минимизировать влияние возбуждающей катушки на приемную. Измерения проводились на частоте собственного резонанса s_0 – моды Лэмба в диапазоне частот 50 – 150 кГц. На предварительно динамически размагниченных образцах измерялись следующие характеристики: U – ЭДС, индуцируемая в приемной катушке вторичным электромагнитным полем (это напряжение оцифровывается АЦП Е20-10 с частотой дискретизации 10 МГц и регистрируется в памяти компьютера); f_p – частота резонанса, Q^{-1} – затухание ультразвука. Затухание измеряли методом свободно затухающих колебаний [11].

1 – генератор переменной частоты; 2, 3 – возбуждающая и приемная катушки;
4 – образец; 5 – приёмное устройство; H_0 – постоянное магнитное поле (поле поляризации)

Рис. 1. Блок-схема резонансной установки и распределение магнитного h и акустического u полей вдоль образца

Измерения проводились при комнатной температуре. Для исследования влияния термообработки на магнитоупругие свойства аморфных лент измерения сначала проводились на образце, изготовленном из ленты в исходном (аморфном состоянии). Затем на этом же образце после изотермического отжига в течение 1 часа. Печь для отжига имела бифилярную обмотку и запитывалась постоянным током. Температура печи

поддерживалась с точностью $\pm 3^\circ\text{C}$. По результатам эксперимента анализировалось отношение $UQ^{-1}/U_{ам}Q_{ам}^{-1}$, позволяющее судить о влиянии отжига на эффективность ЭМА-преобразования UQ^{-1} . В материалах с небольшим затуханием измерение магнитоупругих свойств ЭМА-методом не представляет сложностей. Внутреннее трение при реализации свободных затухающих колебаний рассчитывается по формуле $Q^{-1} = 1/(\pi f_p \Delta t)$, f_p – резонансная частота, Δt – время затухания сигнала в e раз. Для аморфных магнитных сплавов характерно большое затухание, что делает невозможным использование указанной формулы. Кроме того, вычисление модуля упругости по формуле $E = f_p^2 L^2 \rho$ по измеренной резонансной частоте f_p , длине L и плотности ρ ленты, как это проводилось в [12], возможно только при малых затуханиях в ленте.

Ранее нами была предложена математическая модель резонансного электромагнитно-акустического метода измерения магнитоупругих свойств аморфных ферромагнитных лент, учитывающая внутреннее трение [5]. Она позволяет более точно измерять модуль упругости и величину внутреннего трения.

Согласно этой модели, решение уравнения

$$\sin\left(4\pi \frac{f_p}{f_0}\right) + \operatorname{sh}\left(2\pi \frac{f_p^3}{f_0^3} \frac{1}{\pi f_p \Delta t}\right) \frac{2f_p^2}{f_0^2} \frac{1}{\pi f_p \Delta t} = 0. \quad (1)$$

относительно основной резонансной частоты f_0 ,

$$f_0 = C/L = \frac{1}{L} \sqrt{E(H_0)/\rho}, \quad (2)$$

позволит определить точную зависимость модуля Юнга от поляризующего поля. Магнитоупругое затухание рассчитывается по формуле

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{\sqrt{[E_0/(\xi\omega)]^2 + 1}}, \quad (3)$$

где ξ – параметр, характеризующий внутреннее трение $\xi = \frac{L^2 \rho}{2\pi^2 \Delta t}$.

При увеличении внутреннего трения Q^{-1} уменьшается число колебаний между фиксированными уровнями сигнала U и U/e , и ошибка измерения возрастает. Использование АЦП в экспериментальной установке позволило уменьшить ошибку счетной системы, которая дает основной вклад в ошибку измерения при больших затуханиях [11].

При измерении реализован метод прямого измерения коэффициента затухания механических колебаний исследуемой ленты. Он заключается в следующем. Образец возбуждают на второй гармонике в течение определенного времени, а затем выключают возбуждение. Образец продолжает совершать затухающие колебания, которые наводят э.д.с. в измерительной катушке. Это напряжение оцифровывается АЦП Е20-10 с частотой дискретизации 10 МГц и регистрируется в памяти компьютера. Оцифрованное напряжение, наводимое в измерительной катушке, на выходе АЦП можно описать выражением

$$u(t_j) = A \exp \frac{-t_j}{\Delta t} \sin(2\Omega_1 t_j) + \varepsilon_j, \quad (4)$$

где A – неизвестная амплитуда, Δt – характерное время затухания сигнала, Ω_1 – первая гармоника резонанса образца, $u(t_j)$ – отсчеты АЦП, $t_j = \delta t n$ – времена дискретизации

сигнала, δt – расстояние между отсчетами сигнала, $n = [0, N]$, N – объем выборки, ε_j – ошибки.

Частота оцифровки в пятьдесят раз больше частоты второй гармоники, поэтому условие корректной оцифровки выполняются, и мы имеем достаточно большой статистически значимый объем выборки.

Для определения неизвестных величин воспользуемся методом наименьших квадратов. Поскольку частота колебаний и времена дискретизации нам известны точно, то можно упростить уравнение регрессии

$$Z(t_j) = \frac{u(t_j)}{\sin(2\Omega_1 t_j)} = A \exp \frac{-t_j}{\Delta t}. \quad (5)$$

Линеаризуем уравнение (5), для этого прологарифмируем уравнение (5), получим линейное уравнение регрессии

$$\ln[Z(t_j)] = \ln A - \frac{t_j}{\Delta t}. \quad (6)$$

Согласно [13] получаем оценку величины затухания:

$$\frac{1}{\Delta t} = \frac{N \sum \ln[Z(t_j)] t_j - \sum t_j \sum \ln[Z(t_j)]}{N \sum t_j^2 - (\sum t_j)^2}. \quad (7)$$

Регистрацию, предварительную обработку и вычисления по формулам (5) – (7) осуществляет компьютер с помощью оригинального ПО.

Таким образом, можно считать, что систематическая ошибка при определении модуля Юнга и магнитоупругого затухания будет определяться точностью определения резонансной частоты f_p (по резонансному пику при сканировании по частоте) и времени затухания Δt . Необходимо также учитывать, что материал опорной пластины влияет на измеряемую величину Δt за счет демпфирования образца. Один из способов уменьшить это влияние – использование для изготовления опорной пластины материалов с наименьшим трением скольжения.

На рис. 2 представлена зависимость внутреннего трения от температуры отжига. В интервале $440^\circ\text{C} < T_{\text{отж}} < 500^\circ\text{C}$ наблюдаются аномально высокие значения магнитоупругого затухания, что связано с появлением нормальной составляющей магнитных моментов, обусловленным образованием малых количеств кристаллической фазы в поверхностном слое ленты [14]. Высокие значения магнитоупругого затухания приводят к росту влияния внутреннего трения на резонансную частоту и, как следствие, на измеряемый (динамический) модуль упругости.

Полевые зависимости Q^{-1} , представленные на рис. 3, для лент, отожженных при температурах ниже 400°C , указывают на монотонное уменьшение внутреннего трения с полем поляризации. Отжиг при более высоких температурах приводит к качественному изменению в полевых зависимостях Q^{-1} . В малых полях внутреннее трение возрастает, достигая максимума при некотором значении поляризующего поля, и затем наблюдается его резкое уменьшение. Из полевых зависимостей Q^{-1} можно сделать некоторые предположения о вкладе каждого из механизмов в затухание. Согласно [15] полевые потери от макровихревых токов Q_a^{-1} имеют максимум. Как правило, наибольшее значение потерь Q_a^{-1} достигается при намагниченности $I = (0.8 - 0.9)I_s$ [15]. Из оценок, сделанных на основании нисходящей ветви квазистатической петли магнитного гистерезиса (рис. 4), намагниченность $I = (0.8 - 0.9)I_s$ достигается в магнитных полях 125 А/м и выше.

На полевых зависимостях внутреннего трения максимум наблюдается в полях меньших чем 85 А/м. Таким образом, потери на макровихревые токи Q_a^{-1} даже при $H_0 = H_0(Q_a^{-1})_{\max}$, не превышают потери на микровихревые токи Q_i^{-1} и гистерезисные потери Q_h^{-1} .

Измерение петель гистерезиса проходило при частоте перемagnetизования 1 Гц. ЭДС, наводимая в эталонной измерительной катушке, оцифровывалась АЦП и затем производилось интегрирование сигнала методом трапеций. Влияние поля Земли компенсировалось симметрированием петли гистерезиса, которое осуществлялось в компьютере смещением графика петли гистерезиса вдоль оси H .

Рис. 2. Зависимость внутреннего трения в сплаве $\text{Fe}_{73.7}\text{Cu}_{1.0}\text{Nb}_{3.2}\text{Si}_{12.7}\text{B}_{9.4}$ от температуры отжига

Рис. 3. Зависимость внутреннего трения от поля поляризации в сплаве $\text{Fe}_{73.7}\text{Cu}_{1.0}\text{Nb}_{3.2}\text{Si}_{12.7}\text{B}_{9.4}$ после отжига при различных температурах: 1 – 360 °C, 2 – 400 °C, 3 – 440 °C, 4 – 480 °C, 5 – 520 °C

Рис. 4. Квазистатическая петля намагничивания сплава $\text{Fe}_{73.7}\text{Cu}_{1.0}\text{Nb}_{3.2}\text{Si}_{12.7}\text{B}_{9.4}$ после изотермического (1-часового) отжига при температуре 460°C

Зависимость внутреннего трения от амплитуды возбуждающего поля (рис. 5) и выраженная зависимость от поляризирующего поля (рис. 3) свидетельствуют о большом вкладе гистерезисных потерь в магнитомеханическое затухание.

Рис. 5. Зависимость внутреннего трения сплава $\text{Fe}_{73.7}\text{Cu}_{1.0}\text{Nb}_{3.2}\text{Si}_{12.7}\text{B}_{9.4}$ от амплитуды переменного возбуждающего поля h после отжига при различных температурах

На рис. 6 представлены зависимости внутреннего трения от частоты возбуждающего поля. Измерения проведены на частотах, соответствующих первой, второй и третьей моде. Рост внутреннего трения с частотой свидетельствует о вкладе потерь на микровихревые токи в магнитоупругое затухание в сплаве. Внутреннее трение Q_i^{-1} , обусловленное микровихревыми токами, обратно пропорционально внутренним напряжениям σ_i^2 . Уменьшение внутренних напряжений в результате отжига приводит к существенному возрастанию Q_i^{-1} . Один из источников потерь на микровихревые токи – вращение вектора локальной намагниченности, которое после отжигов в интервале температур 440 – 500 °С и приводит к аномальному увеличению дифференциальной магнитострикции и, как следствие, к экспоненциальному росту эффективности ЭМА-преобразования.

Рис. 6. Зависимость внутреннего трения в сплаве $Fe_{73.7}Cu_{1.0}Nb_{3.2}Si_{12.7}B_{9.4}$ от частоты возбуждающего поля (измерения на частоте первой, второй и третьей моды)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментальное изучение внутреннего трения в аморфном сплаве $Fe_{73.7}Cu_{1.0}Nb_{3.2}Si_{12.7}B_{9.4}$ показало, что нанокристаллизующий отжиг при температурах $440\text{ °C} < T_{отж} < 500\text{ °C}$ приводит к аномальному росту магнитоупругих потерь. Внутреннее трение возрастает в сотни раз. Основной вклад в магнитоупругое затухание в сплаве после нанокристаллизующего отжига вносят гистерезисные потери и потери на микровихревые токи.

Высокое затухание, свойственное материалам со смешанной аморфно-нанокристаллической структурой, затрудняет измерение их динамических магнитоупругих свойств. В работе подробно проанализирована методика и погрешности измерения свойств таких материалов с использованием метода электромагнитно-акустического преобразования.

Процесс измерения проанализирован с помощью математической модели возбуждения, распространения и затухания упругих колебаний в лентах, результаты моделирования положены в основу методики и алгоритмов измерения.

Оцифровка, накопление массива, математическая (с помощью модели) и статистическая обработка данных позволили уменьшить систематическую ошибку эксперимента. Все результаты измерений приведены для средних величин по множеству статистических значимых реализаций, полученных при многократном повторении эксперимента.

Работа выполнена в ФТИ УдмФИЦ по бюджетной тематике при выполнении НИР № 4А-А17-117022250037-0.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лукшина В. А., Дмитриева Н. В., Волкова Е. Г., Шишкин Д. А. Магнитные свойства сплава $\text{Fe}_{63.5}\text{Ni}_{10}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$, нанокристаллизованного в присутствии растягивающих напряжений // Физика металлов и металловедение. 2019. Т. 120, № 4. С. 346-351. <https://doi.org/10.1134/S0015323019040077>
2. Ершов Н. В., Федоров В. И., Черненко Ю. П., Лукшина В. А., Шишкин Д. А. Влияние кристаллизующего отжига под нагрузкой на магнитные свойства и структуру магнито-мягкого сплава FeSiNbCuB , легированного хромом // Физика твердого тела. 2017. Т. 59, № 9. С. 1724-1737. <https://doi.org/10.21883/FTT.2017.09.44843.078>
3. Степанова Е. А., Волчков С. О., Лукшина В. А., Шишкин Д. А., Худякова Д. М., Laghaïaga A., Курляндская Г. В. Структура, магнитные свойства и магнитный импеданс быстрозакаленных лент сплавов на основе FINMET в исходном состоянии и после термической обработки // Физика металлов и металловедение. 2020. Т. 121, № 10. С. 1052-1058.
4. Комаров В. А. Магнитоупругое электромагнитно-акустическое преобразование. Часть 4. Соотношение компонент тензора магнитоупругости с магнитострикцией при эффекте Джоуля // Контроль. Диагностика. 2018. № 9. С. 20-29.
5. Леньков С. В., Федорова Н. В. Резонансный электромагнитно-акустический метод измерения вязко-упругих свойств аморфных ферромагнитных лент, подвергнутых низкотемпературному отжигу // Физика металлов и металловедение. 2014. Т. 115, № 8. С. 800-806. <https://doi.org/10.7868/S0015323014080105>
6. Федорова Н. В., Леньков С. В., Коньгин Г. Н., Немцова О. М. Влияние кристаллизующего отжига на динамические магнитоупругие свойства аморфного сплава $\text{Fe}_{81}\text{Si}_7\text{B}_{12}$ // Физика металлов и металловедение. 2019. Т. 120, № 6. С. 601-607. <https://doi.org/10.1134/S0015323019060056>
7. Аносова М. О., Балдохин Ю. В., Вавилова В. В., Иевлев В. М., Калинин Ю. Е., Корнеев В. П., Палий Н. А. Образование нанокомпозитов при отжиге аморфных сплавов системы Fe-P-Si // Неорганические материалы. 2009. Т. 45, № 9. С. 1068-1073.
8. Кобелев Н. П., Сойфер Я. М., Бродова И. Г., Манухин А. Н. Внутреннее трение и изменение модуля Юнга в сплаве Mg-Ni-Y , обусловленное переходом из аморфного в нанокристаллическое состояние // Физика твердого тела. 1999. Т. 41, № 4. С. 561-566.
9. Комаров В. А. Квазистационарное электромагнитно-акустическое преобразование в металлах. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1986. 240 с.
10. Викторов И. А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике. М.: Наука, 1966. 168 с.
11. Постников В. С. Внутреннее трение в металлах. 2-е изд. М.: Металлургия, 1974. 352 с.
12. Золотухин И. В., Калинин Ю. В., Кондусов В. А., Суходолов Б. Г. ΔE -эффект в аморфном сплаве $\text{Fe}_{74}\text{Co}_{10}\text{B}_{16}$ // Металлофизика. 1989. Т. 11, № 4. С. 48-51.
13. Пустыльник Е. И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений. М.: Наука, 1968. 288 с.
14. Боровкова М. А., Ильясов Р. С., Федорова Н. В., Елсуков Е. П., Загайнов А. В., Коньгин Г. Н., Немцова О. М. Влияние кристаллизационного отжига на динамические магнитоупругие свойства аморфного сплава $\text{Fe}_{73.7}\text{Cu}_{1.0}\text{Nb}_{3.2}\text{Si}_{12.7}\text{B}_{9.4}$ // Физика металлов и металловедение. 2009. Т. 107, № 3. С. 261-269.
15. Кекало И. Б. Магнитоупругие явления // В кн.: Итоги науки и техники. Металловедение и термическая обработка. М.: ВИНТИ, 1973. С. 5-88.

Study of the Magnetoelastic Properties of the $\text{Fe}_{73.7}\text{Cu}_{1.0}\text{Nb}_{3.2}\text{Si}_{12.7}\text{B}_{9.4}$ Amorphous-Crystalline Alloy and Experimental Technique by Use of Electromagnetic Acoustic Transformation

Fedorova N. V., Lenkov S. V.

Udmurt Federal Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Science, Izhevsk, Russia

SUMMARY. Using the method of electromagnetic acoustic transformation (EMAT) we investigated influence of crystallization processes on internal friction of the $\text{Fe}_{73.7}\text{Cu}_{1.0}\text{Nb}_{3.2}\text{Si}_{12.7}\text{B}_{9.4}$ amorphous alloy. The high damping in materials with a mixed amorphous-nanocrystalline structure makes it difficult to measure their dynamic magnetoelastic properties. In the paper the technique and errors in measuring the magnetoelastic properties of such materials by use of electromagnetic acoustic transformation are analyzed in detail. The measurement process is analyzed by use of the mathematical model of excitation, propagation and damping of elastic vibrations in magnetic ribbons, the simulation results form the basis for the measurement technique and algorithms. Digitization, array accumulation, mathematical (using the model) and statistical data processing allowed to reduce the systematic error. All measurement results are given for the average values for a set of statistically significant realizations obtained by multiple repetitions of the experiment. The samples for the study were made using $\text{Fe}_{73.7}\text{Cu}_{1.0}\text{Nb}_{3.2}\text{Si}_{12.7}\text{B}_{9.4}$ amorphous ribbon. Each of the samples was annealed for an hour at a certain temperature below the crystallization temperature. The informative parameters of EMAT, determined by internal friction, were measured on these samples at room temperature. Registration, preprocessing and calculation were carried out by a computer using proprietary software. According to the experimental results an anomalous increase in internal friction was observed in the samples after nanocrystallizing annealing ($440^\circ\text{C} < T_{\text{ann}} < 500^\circ\text{C}$). Magnetoelastic damping losses increase hundreds of times as compared to losses in amorphous samples. In the paper the dependences of internal friction on the magnetization field, on the field and frequency of the exciting coil are presented in the samples after annealing at different temperatures. Analysis of these characteristic curves showed a significant contribution of hysteresis losses and losses from micro-eddy currents to internal friction.

KEYWORDS: magnetoelastic damping, modules of elasticity, magnetic amorphous ribbons, nanocrystallization, electromagnetic acoustic transformation, systematic error.

REFERENCES

1. Lukshina V. A., Dmitrieva N. V., Volkova E. G., Shishkin D. A. Magnetic properties of the $\text{Fe}_{63.5}\text{Ni}_{10}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ alloy nanocrystallized in the presence of tensile stresses. *The Physics of Metals and Metallography*, 2019, vol. 120, no. 4, pp. 320-324. <https://doi.org/10.1134/S0031918X19040070>
2. Ershov N. V., Lukshina V. A., Shishkin D. A., Fedorov V. I., Chernenkov Y. P. Effect of crystallization annealing under loading on the magnetic properties and the structure of a soft magnetic FeSiNbCuB alloy doped with chromium. *Physics of the Solid State*, 2017, vol. 59, no. 9, pp. 1748-1761. <https://doi.org/10.1134/S1063783417090074>
3. Stepanova E. A., Volchkov S. O., Lukshina V. A., Shishkin D. A., Khudyakova D. M., Larrañaga A., Kurlyandskaya G. V. Struktura, magnitnye svoystva i magnitnyy impedans bystrozakalennykh lent splavov na osnove FINMET v iskhodnom sostoyanii i posle termicheskoy obrabotki [Structure, magnetic properties and magnetic impedance of fast-quenched FINMET-based alloy belts in the initial state and after heat treatment]. *Fizika metallov i metallovedenie* [The Physics of Metals and Metallography], 2020, vol. 121, no. 10, pp. 1052-1058. <https://doi.org/10.31857/S0015323020090089>
4. Komarov V. A. Magnituprugoe elektromagnitno-akusticheskoe preobrazovanie. Chast' 4. Sootnoshenie komponent tenzora magnituprugosti s magnitostriksiey pri effekte Dzhoulya [Magnetoelastic electromagnetic acoustic transformation. Part 4. Ratio between magnetoelasticity tensor components and magnetostriction for Joule effect]. *Kontrol'. Diagnostika* [Testing. Diagnostics], 2018, no. 9, pp. 20-29. <https://doi.org/10.14489/td.2018.09.pp.020-029>
5. Len'kov S. V., Fedorova N. V. Resonance electromagnetoacoustic method of measuring viscoelastic properties of amorphous ferromagnetic ribbons subjected to low-temperature annealing. *The Physics of Metals and Metallography*, 2014, vol. 115, no. 8, pp. 749-755. <https://doi.org/10.1134/S0031918X14080109>

6. Fedorova N. V., Lenkov S. V., Konygin G. N., Nemtsova O. M. Effect of crystallizing annealing on dynamic magnetoelastic properties of the $\text{Fe}_{81}\text{Si}_7\text{B}_{12}$ amorphous alloy. *The Physics of Metals and Metallography*, 2019, vol. 120, no. 6, pp. 549-555. <https://doi.org/10.1134/S0031918X1906005X>
7. Anosova M. O., Vavilova V. V., Korneev V. P., Palii N. A., Baldokhin Y. V., Ievlev V. M., Kalinin Y. E. Formation of nanocomposites during annealing of amorphous Fe-P-Si alloys. *Inorganic Materials*, 2009, vol. 45, no. 9, pp. 993-997. <https://doi.org/10.1134/S002016850909009X>
8. Kobelev N. P., Sojfer Ja. M., Brodova I. G., Manuhin A. N. Internal friction and change in Young's modulus in the alloy Mg-Ni-Y due to a transition from an amorphous to a nanocrystalline state. *Physics of the Solid State*, 1999, vol. 41, iss. 4, pp. 501-505. <https://doi.org/10.1134/1.1130813>
9. Komarov V. A. *Kvazistatsionarnoe elektromagnitno-akusticheskoe preobrazovanie v metallakh* [Quasi-stationary electromagnetic-acoustic transformation in metals]. Sverdlovsk: UNTs AN SSSR Publ., 1986. 235 p.
10. Viktorov I. A. *Fizicheskie osnovy primeneniya ul'trazvukovykh voln Releya i Lemba v tekhnike* [Physical bases of application of Rayleigh and Lamb ultrasonic waves in engineering]. Moscow: Nauka Publ., 1966. 168 p.
11. Postnikov V. S. *Vnutrennee trenie v metallakh* [Internal friction in metals]. 2-e izd. Moscow: Metallurgiya Publ., 1974. 352 p.
12. Zolotukhin I. V., Kalinin Yu. V., Kondusov V. A., Sukhodolov B. G. ΔE -эффект в аморфном сплаве $\text{Fe}_{74}\text{Co}_{10}\text{B}_{16}$ [ΔE -effect in Amorphous $\text{Fe}_{74}\text{Co}_{10}\text{B}_{16}$ alloy]. *Metallofizika* [Physics of Metals], 1989, vol. 11, no. 4, pp. 48-51.
13. Pustyl'nik E. I. *Statisticheskie metody analiza i obrabotki nablyudeniy*. [Statistical methods for analyzing and processing observations]. Moscow: Nauka Publ., 1968, 288 p.
14. Borovkova M. A., Il'yasov R. S., Fedorova N. V., Elsukov E. P., Zagainov A. V., Konygin G. N., Nemtsova O. M. Effect of crystallization annealing on the dynamic magnetoelastic properties of the $\text{Fe}_{73.7}\text{Cu}_{1.0}\text{Nb}_{3.2}\text{Si}_{12.7}\text{B}_{9.4}$ amorphous alloy. *The Physics of Metals and Metallography*, 2009, vol. 107, no. 3, pp. 245-253. <https://doi.org/10.1134/S0031918X09030053>
15. Kekalo I. B. Magnitoprugie yavleniya [Magnetoelastic phenomena]. V kn.: *Itogi nauki i tekhniki. Metallovedenie i termicheskaya obrabotka* [In the book: Results of Science and Technology. Metallurgy and heat treatment]. Moscow: VINITI Publ., 1973, pp. 5-88.

Федорова Надежда Владимировна, младший научный сотрудник,
Физико-технический институт УдмФИЦ УрО РАН, e-mail: fedorovanv@udman.ru

Леньков Сергей Викторович, доктор технических наук, главный научный сотрудник,
Физико-технический институт УдмФИЦ УрО РАН, e-mail: emp@udman.ru