

## К ВОПРОСУ О СООТНОШЕНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ МАГНИТНОГО И МАГНИТОСТРИКЦИОННОГО МЕХАНИЗМОВ ЭМА-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В ФЕРРОМАГНЕТИКАХ В НОРМАЛЬНОМ ПОДМАГНИЧИВАЮЩЕМ ПОЛЕ

М.М. Сыркин<sup>1</sup>  
Н.А. Щипаков<sup>2</sup>

msyrkin@bmstu.ru  
shchipak@bmstu.ru

<sup>1</sup> ФГАУ «НУЦСК при МГТУ им. Н.Э. Баумана», Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

---

### Аннотация

Наиболее распространенный подход к выбору параметров при проектировании ЭМА-преобразователей в первую очередь заключается в учете лоренцева или магнитоотрицательного механизмов ЭМА-преобразования при их расчете. В отличие от указанного подхода здесь подробно рассмотрены и экспериментально исследованы два коллинеарно действующих механизма ЭМА-преобразования, возникающих при возбуждении ультразвуковых колебаний в ферромагнетиках в нормальном подмагничивающем поле: магнитоотрицательный и магнитный на основе ферромагнитного притяжения. Показаны зависимости эффективности ЭМА-преобразования для обоих механизмов от индукции подмагничивания. Установлены диапазоны значений магнитной индукции подмагничивания, при которых ЭМА-преобразование наиболее эффективно для каждого механизма. Определены факторы влияния остаточной намагниченности и внутренних напряжений, которые затрудняют расчет эффективности ЭМА-преобразователей и приводят к разбросу реальной эффективности ЭМА-преобразователей, спроектированных с использованием расчета эффекта магнитоотрицательности. Для обеспечения высокой эффективности ЭМА-преобразования и хорошей повторяемости его параметров при проектировании ЭМА-преобразователей предложено выбирать значение индукции подмагничивания, соответствующее максимальной эффективности магнитного механизма ЭМА-преобразования

### Ключевые слова

*ЭМА-преобразователь, магнитный механизм, ЭМА-преобразование, магнитоотрицательность, деформация, ультразвуковой контроль, остаточная намагниченность*

Поступила 14.02.2024

Принята 08.05.2024

© Автор(ы), 2024

**Введение.** Область применения ЭМА-преобразователей (ЭМАП) стремительно увеличивается. В последнее десятилетие ЭМАП практически вытеснили пьезоэлектрические преобразователи в таких областях дефектоскопии, как толщинометрия и контроль изделий с большими площадями (листов, труб разного диаметра, хранилищ и т. п.), и стали использоваться, например, при анализе напряженного состояния металла. За последние годы опубликованы сотни работ, посвященных исследованиям и разработкам электромагнитно-акустических преобразователей. Так, в [1] приведен подробный обзор достижений в области ЭМАП, а в [2–10] — результаты современных научных исследований. Однако до создания полной и удобной для инженерных расчетов теории, позволяющей определить параметры ЭМАП для множества задач дефектоскопии, еще далеко. Существуют серьезные трудности в реализации ЭМАП нормальной продольной волны для ферромагнетиков.

Принцип работы ЭМАП на ферромагнитных материалах заключается в совместном действии трех механизмов (лоренцев, магнитострикционный и магнитный) взаимодействия переменного поля катушек индуктивности, постоянного подмагничивающего поля и материала контролируемого объекта.

Наиболее подробно изучен лоренцев механизм ЭМА-преобразования, который называют токовым, или электродинамическим, так как сила Лоренца, действующая на частицы металла, является векторным произведением индукции подмагничивающего поля и наведенного тока в изделии. Классический пример — колебание частицы металла параллельно плоскости изделия при нормальном подмагничивании и формирование нормальной поперечной волны. Методика инженерного расчета формирования и приема такой волны приведена в [11]. Лоренцев механизм ЭМА-преобразования с нормальным подмагничиванием может формировать волны, у которых имеется и вертикальное смещение частиц, например, волны Рэлея и SV-волны, однако расчет таких преобразователей заметно сложнее [12, 13].

Во многих работах упоминается магнитострикционный механизм ЭМА-преобразования, который заключается в изменении линейных и объемных размеров изделия под влиянием магнитного поля. Направление действия магнитострикционного механизма коллинеарно направлению линейной комбинации магнитного поля подмагничивания и магнитного поля катушки возбуждения. Например, в [14] приведена теория расчета магнитострикционного эффекта, получены зависимости эффекта для различных материалов. Расчет магнитострикционного механизма весьма сложен

(выражения для передаточных функций очень громоздки), поэтому для инженерных целей обычно используют экспериментальные кривые.

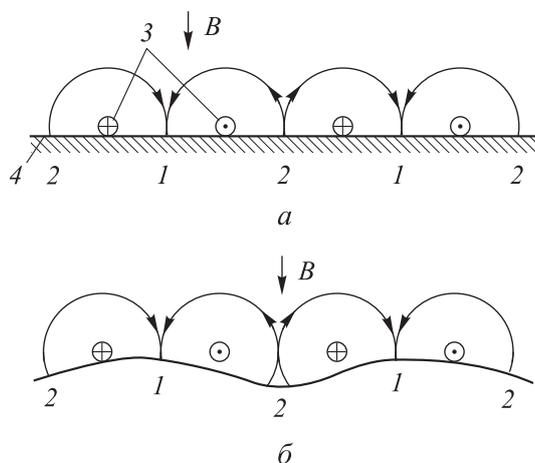
Реже упоминается магнитный механизм ЭМА-преобразования (см., например, [15–17]), который заключается в действии сил ферромагнитного притяжения под влиянием суммы магнитных полей подмагничивания и магнитного поля катушки возбуждения. Магнитный механизм ЭМА-преобразования для непроводящего феррита подробно рассмотрен в [15]. Однако примененный для его описания математический аппарат весьма труден для инженерного расчета. Совместное влияние электродинамического и магнитного механизмов на формирование волны Рэлея показано в [16].

**Постановка задач исследования.** Во многих работах, описывающих формирование нормальной поперечной волны, магнитный механизм не упоминается вследствие его малого влияния на процесс, но при рассмотрении формирования волн Рэлея и SV-волн его влиянием уже нельзя пренебрегать. Под продольной деформацией ферромагнитного материала под влиянием магнитного поля понимается только магнитострикционный механизм без учета магнитного [18]. Действия этих двух механизмов схожи, так как у них коллинеарно направлены действующие силы, но как будет показано дальше, они могут заметно отличаться, например, быть противофазными. Во-первых, ввиду нелинейной, а для магнитострикции — и меняющей знак, зависимости деформации от суммарного магнитного поля эти два механизма по-разному действуют при разных значениях поля подмагничивания. Во-вторых, не отслеживается соотношение величин этих сил и не рассматривается влияние разброса подмагничивающего поля под действием остаточной намагниченности и других факторов. В-третьих, без учета магнитного механизма нельзя объяснить трудности получения нормальной продольной волны ЭМА-методом [19].

*Цель работы* — повысить эффективность ЭМА-преобразователей для возбуждения ультразвуковых колебаний в ферромагнетиках в нормальном подмагничивающем поле за счет учета вертикального смещения поверхности изделия под влиянием как нормальной составляющей сил ферромагнитного притяжения (ФМП), так и эффекта магнитострикции.

**Методика проведения исследований.** Действие ФМП можно показать, рассмотрев процесс возбуждения поверхностной волны в противофазном излучателе, который представляет собой решетку из параллельных проводников: в каждом следующем проводнике направление тока меняется на противоположное.

Поле подмагничивания с индукцией  $B$ , создаваемое внешней магнитной системой, равномерно притягивает верхний слой изделия. Над металлической поверхностью изделия расположены проводники с током (рис. 1, а). Ток в соседних проводниках находится в противоположных фазах. Проводники создают справа и слева от себя магнитные поля, совпадающие или противоположные магнитному полю подмагничивания. В зоне 1 магнитное поле проводника с током суммируется с полем подмагничивания, в зоне 2 магнитное поле проводника вычитается из поля подмагничивания.

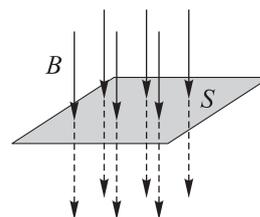


**Рис. 1.** Схемы противофазного излучателя с нормальным подмагничиванием (а) и деформации поверхности под противофазным излучателем с нормальным подмагничиванием за счет ФМП (б):

1 — зоны, в которых магнитные поля проводников складываются с полем подмагничивания внешней магнитной системы; 2 — зоны, в которых магнитные поля проводников вычитаются из полей подмагничивания внешней магнитной системы; 3 — проводники с током; 4 — изделие

Соответственно поверхность в зоне 1 притягивается вверх сильнее, а в зоне 2 — слабее. Поверхность деформируется в виде синусоиды (рис. 1, б), в результате чего создаются условия для формирования волны Рэлея или SV-волны.

Для того чтобы отдельно рассмотреть механизмы ФМП и магнитострикции, проанализируем оба процесса в статическом режиме. Рассмотрим ферромагнитную площадку площадью  $S$  и действующее на нее нормальное поле подмагничивания  $B$  (рис. 2). Аналитическое моделирование процесса деформа-



**Рис. 2.** Действие нормального подмагничивания на ферромагнитную площадку

ции под воздействием ФМП выполнено в соответствии с приведенной ниже методикой.

Сила притяжения ферромагнитной поверхности:

$$F = \frac{B^2 S}{2\mu_0} = \frac{\mu^2 \mu_0 H^2 S}{2}, \quad (1)$$

где  $B$  — магнитная индукция, Тл;  $S$  — площадь поверхности, м<sup>2</sup>;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м — магнитная постоянная;  $\mu$  — относительная магнитная проницаемость;  $H$  — напряженность магнитного поля, А/м.

Следует отметить, что сила притяжения зависит не только от напряженности магнитного поля, но и от относительной магнитной проницаемости, которая в свою очередь кроме как от свойств собственно материала также зависит и от напряженности магнитного поля (кривая Столетова).

Для стали максимум относительной магнитной проницаемости соответствует напряженности магнитного поля  $H \approx 15\,000$  А/м, при этом магнитная индукция составляет 0,5...0,9 Тл.

Зная действующую на поверхность силу, можно определить амплитуду колебаний поверхности изделия при ЭМА-преобразовании:

$$A = \frac{P}{2\pi f C_l \rho} = \frac{P}{\omega z}, \quad (2)$$

где  $f$  — частота колебаний, Гц;  $C_l$  — скорость продольной волны, м/с;  $\rho$  — плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  $\omega$  — циклическая частота колебаний;  $z$  — волновое сопротивление для продольной волны в стали;  $P$  — давление магнитной силы,

$$P = F / S. \quad (3)$$

Для квазистатической модели проще использовать закон Гука, где продольная деформация определяется по формулам

$$\varepsilon = \Delta l / l, \quad (4)$$

$$\varepsilon = \sigma / E. \quad (5)$$

Здесь  $\Delta l$  — изменение длины изделия;  $l$  — длина изделия;  $\sigma$  — механическое напряжение, Па;  $E$  — модуль упругости первого рода (модуль Юнга).

Механическое напряжение:

$$\sigma = F / S. \quad (6)$$

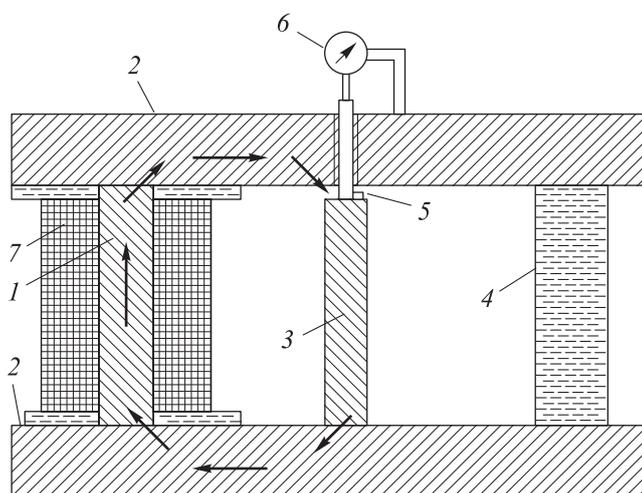
Тогда продольная деформация  $\varepsilon$  с учетом (6) и (1) определяется по формуле:

$$\varepsilon = \frac{B^2}{2E\mu_0}. \quad (7)$$

Амплитуда колебаний с учетом (2)–(6) определяется следующим образом:

$$A = \frac{\varepsilon E}{2\pi f C_{l\rho}} = \frac{\varepsilon E}{\omega z}. \quad (8)$$

Для того чтобы экспериментально оценить эффект от механизмов ФМП и магнитострикции проведены исследования на специально разработанных стендах (рис. 3 и 4).



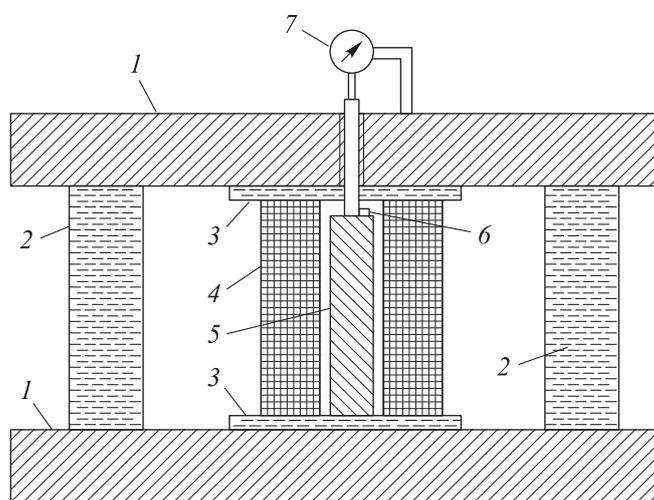
**Рис. 3.** Схема стенда для измерения деформации исследуемого образца под действием сил ФМП и магнитострикции:

- 1 — сердечник электромагнита; 2 — магнитопроводы; 3 — исследуемый образец;  
4 — немагнитный упор; 5 — измеритель магнитной индукции; 6 — микрометр;  
7 — обмотка электромагнита

Для исследования процесса деформации под действием магнитного и магнитострикционного механизмов в нормальном подмагничивающем поле выбран образец из ферромагнитной трубной стали 09Г2С, представляющий собой стержень длиной 100 мм и диаметром 20 мм.

Для измерения деформации исследуемого образца под воздействием ФМП цилиндрический образец помещают между полюсами регулируемого электромагнита, магнитное поле которого растягивает образец (см. рис. 3). Мощный электромагнит с регулируемым током, состоящий из сердечника и обмотки, создает магнитное поле (показано стрелками), которое через

магнитопроводы подводятся к торцам исследуемого образца. Образец жестко прикреплен к нижнему магнитопроводу, в результате чего создается притягивающая сила, которая растягивает исследуемый образец. Немагнитный упор практически исключает изгиб магнитопроводов, что могло бы ухудшить точность измерения деформации образца. Значение растягивающего поля измеряется измерителем магнитной индукции, датчик которого помещен в зазор между полюсом электромагнита и торцом образца. Зазор выбирается на порядок меньше диаметра образца так, чтобы поле на торцах образца можно было полагать равномерным. Удлинение образца измеряется точным микрометром через удлинительный штырь.



**Рис. 4.** Схема стэнда для измерения магнитоэлектрической деформации:

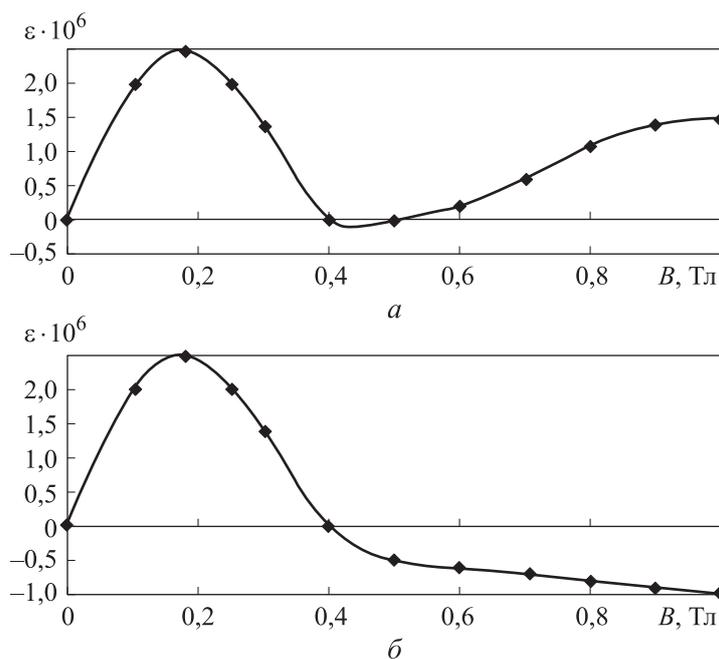
- 1 — пластины большой толщины для обеспечения жесткости конструкции;  
 2 — немагнитные упоры; 3 — каркас катушки; 4 — катушка намагничивания образца;  
 5 — исследуемый образец; 6 — измеритель магнитной индукции; 7 — микрометр

Кроме ФМП, на исследуемый образец влияет и магнитоэлектрический механизм, так как образец намагничивается на всю длину, и получается результат совместного действия двух механизмов.

Для измерения деформации исследуемого образца под действием только магнитоэлектрического механизма необходимо измерить деформацию образца под влиянием только собственного магнитного поля без взаимодействия с полюсами внешних магнитов. При такой конструкции силы ФМП не будут действовать на образец. Для этого спроектирован и изготовлен стэнд (см. рис. 4), в котором обмотка катушки электромагнита наматывается непосредственно на исследуемый образец. Для исключения влияния внешних магнитных полей и магнитопроводов верх-

няя и нижняя пластины соединены между собой немагнитными упорами. При этом не создается замкнутого магнитного контура, верхняя и нижняя пластины намагничиваются очень слабо ( $< 0,05$  Тл), вследствие чего растягивающие силы практически отсутствуют. Деформация образца измеряется микрометром. Датчик измерителя магнитной индукции находится на свободном торце исследуемого образца.

**Обсуждение полученных результатов.** Результаты измерения деформации исследуемого образца под воздействием сил ФМП и магнитострикции, которые получены при различных значениях магнитной индукции на стенде, представленном на рис. 3, приведены на рис. 5, а. Результаты измерения деформации исследуемого образца под воздействием только механизма магнитострикции, определенные при различных значениях магнитной индукции на стенде, показанном на рис. 4, представлены на рис. 5, б. Деформация  $\varepsilon$  определена по (4) с учетом исходной длины образца  $l$  и измеренного микрометром изменения его длины  $\Delta l$ .



**Рис. 5.** Экспериментальные зависимости продольных деформаций образца, вызванные ФМП и магнитострикцией (а) и только магнитострикцией (б), от магнитной индукции

Характер полученной зависимости (см. рис. 5, б) изменения длины образца намагничивания при магнитострикционной деформации вполне соответствует ранее полученным результатам, например в [13].

Получив экспериментальные зависимости деформации исследуемого образца от магнитной индукции для механизма магнитострикции и суммы магнитострикции и ФМП, путем вычитания построим зависимость деформации исследуемого образца под действием только сил ФМП от магнитной индукции (кривая 1, рис. 6). Теоретическая зависимость деформации образца от магнитной индукции рассчитана по (7) (кривая 2, см. рис. 6), модуль упругости для стали 09Г2С равен  $2 \cdot 10^{11}$  Па. Экспериментальная и теоретическая кривые близки друг другу, но есть два отличия:

- 1) на участке  $0,6 \dots 0,9$  Тл деформация увеличивается за счет роста относительной магнитной проницаемости, типичной для железа и сталей;
- 2) на участке более  $0,9$  Тл рост деформации уменьшается, что связано с приближением состояния металла к насыщению.

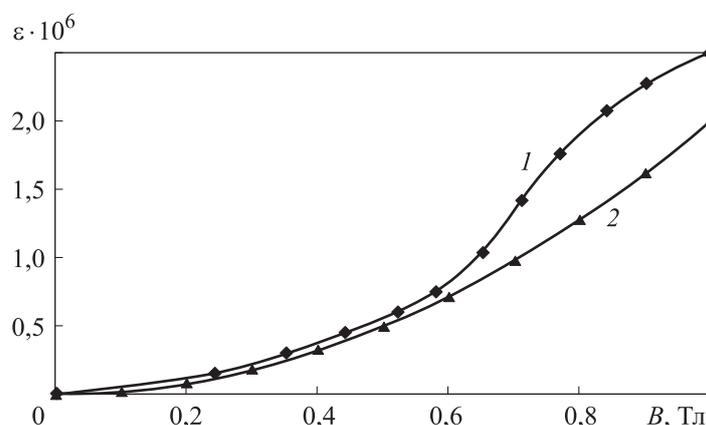


Рис. 6. Экспериментальная (1) и теоретическая (2) зависимости деформации образца, вызванной ФМП, от магнитной индукции

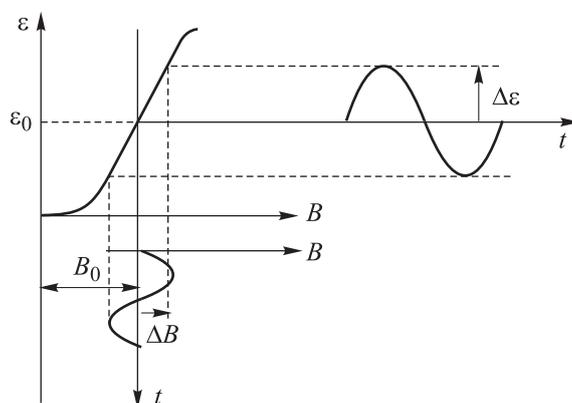
**Определение эффективности ЭМА-преобразования на основе данных о деформации изделия.** Нормальную составляющую амплитуды колебаний поверхности изделия, вызванную полем переменного тока в проводе катушки возбуждения и полем подмагничивания, можно определить с использованием зависимости на рис. 7. Отметим индукцию нормального постоянного подмагничивания ( $B_0$ ), добавим изменение нормальной индукции ( $\Delta B$ ), вызванное током в проводниках катушки возбуждения, и найдем изменение деформации поверхности  $\Delta \varepsilon$  (см. рис. 7).

Для перехода от изменения деформации к амплитуде колебаний поверхности возьмем за основу (8) и с учетом того, что деформация меняется относительно величины  $\varepsilon_0$ , соответствующей  $B_0$ , найдем амплитуду нормальных колебаний поверхности

$$\Delta A = \frac{\varepsilon E}{2\pi f C_{lp}} = \frac{\Delta \varepsilon E}{\omega z}$$

Поскольку деформация поверхности изделия вызвана изменением нормальной составляющей вектора магнитной индукции, эффективность ЭМА-преобразования будет определяться отношением изменения деформации  $\Delta \varepsilon$  при изменении индукции магнитного поля на 1 Тл. Обозначим эффективность ЭМА-преобразования как  $\Delta \varepsilon / \Delta B$ . Тогда с учетом (7) и перехода к бесконечно малым приращениям имеем

$$\frac{d\varepsilon}{dB} = \varepsilon' = \left( \frac{B^2}{2E\mu_0} \right)' = \frac{B}{E\mu_0}$$

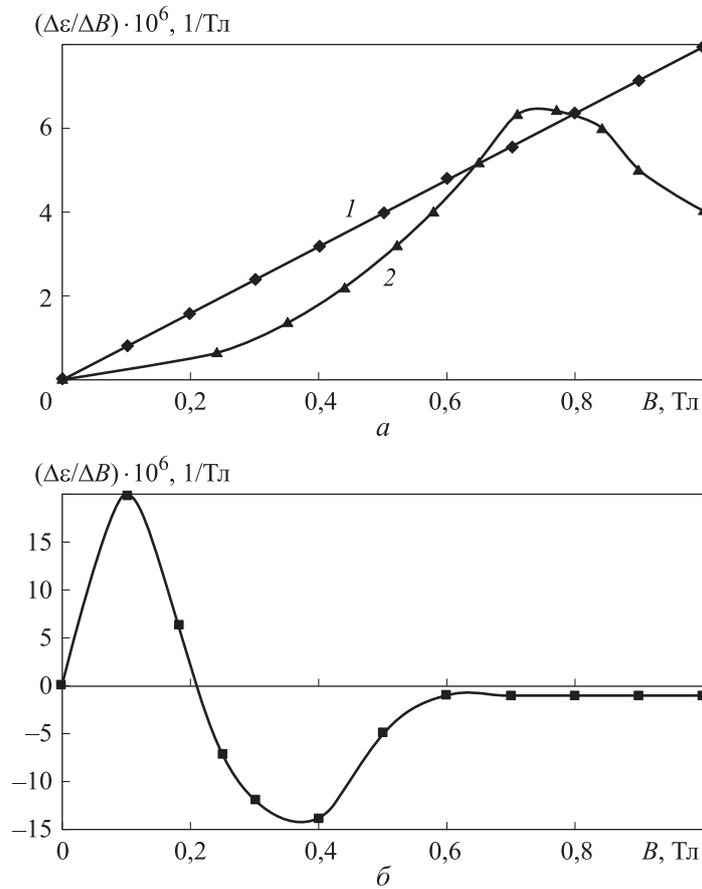


**Рис. 7.** К определению деформации поверхности изделия и амплитуды колебаний под влиянием изменяющейся нормальной составляющей вектора магнитной индукции  $\varepsilon_0$  — деформация, соответствующая  $B_0$

Следовательно, теоретическая кривая эффективности ФМП представляет собой прямую линию (линия 1, рис. 8).

Продифференцировав экспериментально полученную зависимость деформации исследуемого образца от индукции нормального постоянного подмагничивания при действии механизмов ФМП и магнитоstriction (см. рис. 5, б), получим зависимость эффективности ЭМА-преобразований (кривая 2, рис. 8, а). Зависимость эффективности ЭМА-преобразования от намагничивания при магнитоstriction приведена на рис. 8, б.

Экспериментально установлено, что эффективность ЭМАП на основе ФМП при увеличении индукции монотонно возрастает от нуля и достигает максимального значения  $6,5 \cdot 10^{-6}$  1/Тл при  $B = 0,75$  Тл, затем снижается до  $4 \cdot 10^{-6}$  1/Тл при  $B = 1$  Тл. Вследствие изменения относительной магнит-



**Рис. 8.** Теоретическая (1) и экспериментальная (2) зависимости эффективности ЭМА-преобразования от индукции нормального постоянного подмагничивания для механизма ФМП (а) и экспериментальная зависимость эффективности ЭМА-преобразования от индукции нормального постоянного подмагничивания для магнитострикционного механизма (б)

ной проницаемости ФМП не является прямой, что и показывает теоретически полученная зависимость. Эффективность ЭМА-преобразования (см. рис. 8), вызванного механизмом ФМП, начинает увеличиваться быстрее в диапазоне значений магнитной индукции нормального постоянного намагничивания  $0,55 \dots 0,7 \text{ Тл}$ . При магнитной индукции нормального намагничивания более  $0,8 \text{ Тл}$  эффективность ЭМА-преобразования, вызванного механизмом ФМП, снижается.

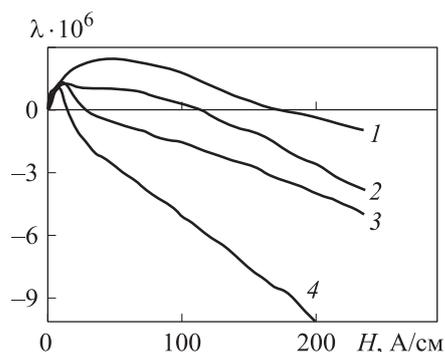
Экспериментально установлено, что эффективность ЭМА-преобразования для магнитострикционного механизма имеет два локальных максимума при значениях магнитной индукции  $0,12$  и  $0,4 \text{ Тл}$ , причем при значении магнитной индукции  $0,4 \text{ Тл}$  фаза возбуждаемых колебаний противо-

положна таковой при магнитной индукции 0,12 Тл. При значениях магнитной индукции более 0,6 Тл эффективность ЭМА-преобразования под действием магнитострикционного механизма практически равна нулю.

Сравнив зависимости на рис. 8, а, б, можно сделать следующий вывод: максимальная эффективность ЭМА-преобразования за счет магнитострикционного механизма в 3 раза выше максимальной эффективности ЭМА-преобразования за счет ФМП. Для эффективного ЭМА-преобразования на основе магнитострикционного механизма требуется меньшая индукция подмагничивания ( $\approx 0,1$  или  $0,4$  Тл) по сравнению с индукцией подмагничивания при ЭМА-преобразовании за счет ФМП ( $0,8$  Тл), что теоретически могло бы сэкономить массу и размеры системы подмагничивания при разработке ЭМАП. Однако это преимущество можно реализовать на практике только при отсутствии остаточной намагниченности и остаточных механических напряжений изделия, что невозможно по нескольким причинам.

Как правило, объект контроля имеет некоторую намагниченность, приобретенную в процессе производства, сварки и пр. Типичная намагниченность на концах трубы для стали 09Г2С может достигать 0,2 Тл [19]. Тогда при индукции подмагничивания, оптимальной для магнитострикционного механизма 0,4 Тл, при одновременном действии поля остаточной намагниченности и поля подмагничивающего механизма имеют место вариации суммарного поля около 0,2...0,6 Тл. Это приводит к случайному изменению эффективности ЭМА-преобразования в диапазоне  $-14 \cdot 10^{-6} \dots 2 \cdot 10^{-6}$  1/Тл, что сводит эффективность ЭМА-преобразования и достоверность контроля практически к нулю.

Эффективность магнитострикционного механизма ЭМА-преобразования зависит от механических напряжений в изделии (рис. 9) [20]. Учитывая, что механические напряжения в трубопроводах могут приближаться к границе текучести, эффективность ЭМА-преобразования может меняться несколько раз и достигать нуля, что также снижает достоверность контроля. Таким образом, надежная и предсказуемая эффек-



**Рис. 9.** Зависимость продольной магнитострикции от намагниченности при значениях остаточного напряжения 0 (1), 50 (2), 150 (3) и 300 МПа (4) для стали 09Г2С9 [20]

тивность ЭМА-преобразования для магнитоотрицательного механизма достижима, если перед испытаниями полностью размагнитить изделие до значения не более 0,05 Тл и снять внутренние напряжения, например, с использованием отжига и последующего отпуска, что не всегда возможно, особенно для труб, тем более в полевых условиях. Без перечисленных операций эффективность ЭМА-преобразования будет изменяться в несколько раз, что существенно снижает достоверность контроля.

Смещение акцента при разработке ЭМАП на механизм ФМП требует индукции подмагничивания примерно 0,7...0,85 Тл, что при расчетной индукции подмагничивания 0,8 Тл и имеющемся остаточном намагничивании изделия  $\pm 0,2$  Тл дает результирующую магнитную индукцию около 0,6...1 Тл. Это, согласно зависимости на рис. 8, б, дает разброс эффективности ЭМА-преобразования  $(4...6,5) \cdot 10^{-6}$  1/Тл (23 %), что достаточно для большинства случаев практического применения. Кроме того, при таких значениях индукции намагниченности эффективность ЭМА-преобразования для магнитоотрицательного механизма не будет влиять на результаты расчетов.

Автоматизированный сканер «Автокон-ЭМА» [21] с системой подмагничивания, имеющей поле с магнитной индукцией 0,8 Тл, испытан на стендовых испытаниях в ПАО «Газпром» [13], в том числе для обнаружения дефектов в основном металле трубы и определения их параметров. Проведены испытания на повторяемость результатов. Испытания проведены на двух стендах, расположенных в Москве и Югорске. Каждый стенд представлял собой сваренную плетку из 4–6 труб диаметром 1420 мм, снятых с разных газопроводов, которые эксплуатировались несколько десятков лет и имели естественные и искусственные дефекты. Сканер успешно прошел все этапы испытаний, показав хорошую повторяемость параметров на разных трубах, и был рекомендован для эксплуатации.

**Выводы.** Теоретически и экспериментально показано влияние намагниченности на нормальную деформацию ферромагнитного стержня отдельно под действием эффектов магнитоотрицательности и ферромагнитного механизма притяжения. Деформация монотонно возрастает при увеличении индукции магнитного поля за счет ФМП и имеет максимум при 0,2 Тл при магнитоотрицательности.

Предложен критерий оценки эффективности ЭМА-преобразования, определяющийся отношением изменения деформации изделия при изменении нормальной индукции магнитного поля на 1 Тл.

Продemonстрировано, что эффективность ЭМА-преобразователя, спроектированного на максимально эффективное применение исключительно магнитоотражательного механизма, может сильно и непредсказуемо изменяться при наличии в объекте контроля остаточной намагниченности и механических напряжений.

Рекомендовано при разработке ЭМАП с нормальным подмагничиванием и формированием волн с вертикальным смещением полагать, что ФМП является доминирующим механизмом, и выбирать конструкцию ЭМАП, которая обеспечит индукцию подмагничивания в диапазоне значений 0,8...0,9 Тл, что позволит получить соответствие экспериментальных параметров расчетным и хорошую повторяемость результатов.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Сучков Г.М., Плеснецов С.Ю., Мещеряков С.Ю. и др. Новые разработки электромагнитно-акустических преобразователей (обзор). *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 2018, № 3, с. 27–34.
- [2] Бусси С., Сучков Г.М., Плеснецов С.Ю. Электромагнитно-акустические преобразователи с импульсными источниками поляризующего магнитного поля для контроля качества ферромагнитных изделий. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 2020, № 1, с. 18–24.
- [3] Мышкин Ю.В. Методы и средства повышения эффективности акустического контроля труб. Дис. ... канд. техн. наук. СПб, СПбГЭТУ ЛЭТИ, 2020.
- [4] Сучков Г.М., Петрищев О.Н., Плеснецов С.Ю. О чувствительности ультразвукового контроля поверхностными волнами, возбуждаемыми и принимаемыми электромагнитно-акустическими преобразователями (обзор, ч. 2). *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 2019, № 1, с. 47–52.
- [5] Петров К.В., Муравьева О.В., Мышкин Ю.В. и др. Моделирование магнитных, электрических и акустических полей проходного преобразователя для контроля цилиндрических объектов. *Дефектоскопия*, 2019, № 2, с. 16–24. EDN: YUTNIT. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0130308219020027>
- [6] Сучков Г.М., Мигущенко Р.П., Кропачек О.Ю. Портативный накладной прямой совмещенный электромагнитно-акустический преобразователь для ультразвукового контроля через диэлектрические слои толщиной до 20 мм на поверхности ферромагнитных металлоизделий. *Дефектоскопия*, 2022, № 5, с. 13–23. EDN: BLPCRM
- [7] Мужичкий В.Ф., Ремезов В.Б., Комаров В.А. К основам ЭМА толщинометрии с помощью накладных преобразователей. I. Прямое ЭМАП в нормальном поляризуемом поле. *Дефектоскопия*, 2006, № 10, с. 40–58. EDN: HUVJCL
- [8] Liu Y., Wang Y., Zhu L., et al. Optimal design of electromagnetic acoustic transducer used to generate lamb wave. *Sens. Transducers*, 2014, vol. 162, no. 1, pp. 29–37.

- [9] Колпаков К.В., Мышкин Ю.В. Исследование влияния механических напряжений на скорость распространения SH-волн в стальном листе. *Приборостроение в XXI веке – 2021. Интеграция науки, образования и производства. Сб. матер. XVII Всерос. науч.-техн. конф.* Ижевск, 2022, с. 203–207. EDN: QCSJMDQ
- [10] Плеснецов С.Ю., Сучков Г.М. Способ электромагнитно-акустического контроля металлических изделий без «мертвой» зоны. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 2018, № 1, с. 42–46.
- [11] Муравьев В.В., ред. *Акустическая тензометрия и структуроскопия железнодорожных колес.* Ижевск, Изд-во ИжГТУ им. М.Т. Калашникова, 2014.
- [12] Мышкин А.В. Влияние конструктивных параметров многоэлементных фазированных преобразователей на формирование акустических полей. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Ижевск, ИжГТУ, 2015.
- [13] Буденков Г.А., Недзвецкая О.В. *Динамические задачи теории упругости.* М., ФИЗМАТЛИТ, 2004.
- [14] Ильясов Р.С. Электромагнитно-акустическое преобразование в магнитоупорядоченных твердых телах. Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Ижевск, ИжГТУ, 2002.
- [15] Ильин И.В. Исследование электромагнитно-акустического метода возбуждения и приема волн Рэлея в ферромагнетиках. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Л., ЛЭТИ, 1979.
- [16] Ильясов Р.С., Бабкин С.Э., Комаров В.А. О механизмах ЭМА-преобразования волн Рэлея в ферромагнетиках при различных частотах. *Дефектоскопия*, 1988, № 10, с. 77–82.
- [17] Алешин Н.П., ред. *Методы акустического контроля металлов.* М., Машиностроение, 1989.
- [18] Чабанов В.Е., Жуков В.А. Расчет и проектирование электромагнитно-акустических преобразователей для ультразвукового неразрушающего контроля. *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки*, 2014, № 3, с. 57–73. EDN: TVTFOV
- [19] Мушников А.Н. Влияние объемного напряженного состояния на магнитные характеристики конструкционных сталей. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, ИМАШ УрО РАН, 2021.
- [20] Алешин Н.П., Гобов Ю.Л., Михайлов А.В. и др. Автоматизированный ультразвуковой контроль труб большого диаметра. *Дефектоскопия*, 2014, № 3, с. 3–11. EDN: SHORTJ
- [21] Ремизов А.Е. Повышение эффективности оценки труб магистральных газопроводов с учетом результатов стендовых испытаний сканеров-дефектоскопов. Дис. ... канд. техн. наук. М., Газпром ВНИИГАЗ, 2015.

**Сыркин Михаил Михайлович** — канд. техн. наук, заместитель начальника конструкторского отдела ФГАУ «НУЦСК при МГТУ им. Н.Э. Баумана» (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Щипаков Никита Андреевич** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Сварка, диагностика и специальная робототехника» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Сыркин М.М., Щипаков Н.А. К вопросу о соотношении эффективности магнитного и магнитоstrictionного механизмов ЭМА-преобразования в ферромагнетиках в нормальном подмагничивающем поле. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2024, № 6 (117), с. 36–54. EDN: BAGUJF

**ON THE QUESTION OF THE RATIO OF THE EFFECTIVENESS OF MAGNETIC AND MAGNETOSTRICTIVE MECHANISMS OF EMA TRANSFORMATION IN FERROMAGNETS IN A NORMAL MAGNETIZING FIELD**

M.M. Syrkin<sup>1</sup>

msyrkin@bmstu.ru

N.A. Shchipakov<sup>2</sup>

shchipak@bmstu.ru

<sup>1</sup> “Welding and Testing” of MSTU n.a. Bauman, Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

---

**Abstract**

In the process of designing EMA transducer, the most common approach is to take into account the Lorentzian or magnetostrictive mechanisms of the EMA transformation during calculations. In this article, two mechanisms of the EMA transformation arising from the excitation of ultrasonic vibrations in ferromagnets in a normal magnetizing field are considered in detail and experimentally investigated: magnetostrictive and magnetic based on ferromagnetic attraction. The efficiency of the EMA transformation for each mechanism was evaluated depending on the induction of magnetization. The ranges of values of the magnetic induction of magnetization are determined, at which the EMA transformation is most effective for each mechanism. The factors influencing the residual magnetization and internal stresses have been determined, which make it difficult to calculate the efficiency of EMA transducer and lead to a spread in the actual efficiency of EMA transducer designed using the calculation of the magnetostriction effect. In order to ensure high efficiency

**Keywords**

*Electromagnetic-acoustic transducer, magnetostriction, ferromagnetic attraction, deformation, ultrasonic testing, residual magnetization*

of the EMA transformation and good repeatability of its parameters, when designing EMA transducer, it is proposed to choose the value of the magnetization induction corresponding to the maximum efficiency of the magnetic mechanism of the EMA transformation

Received 14.02.2024

Accepted 08.05.2024

© Author(s), 2024

## REFERENCES

- [1] Suchkov G.M., Plesnetsov S.Yu., Meshcheryakov S.Yu., et al. New developments of electromagnetoacoustic transducers (review). *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchiy kontrol*, 2018, no. 3, pp. 27–34 (in Russ.).
- [2] Bussi S., Suchkov G.M., Plesnetsov S.Yu. Electromagnetic-acoustic converters with pulsed sources of polarizing magnetic field for quality control of ferromagnetic products. *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchiy kontrol*, 2020, no. 1, pp. 18–24 (in Russ.).
- [3] Myshkin Yu.V. Metody i sredstva povysheniya effektivnosti akusticheskogo kontrolya trub. Diss. kand. tekhn. nauk [Methods and means of increasing the efficiency of acoustic control of pipes. Diss. Cand. Sc. (Eng.)]. St. Petersburg, ETU “LETI”, 2020 (in Russ.).
- [4] Suchkov G.M., Petrishchev O.N., Plesnetsov S.Yu. About the sensitivity of ultrasonic testing by surface waves excited and received by electromagnetic-acoustic transducers (review, p. 2). *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchiy kontrol*, 2019, no. 1, pp. 47–52 (in Russ.).
- [5] Petrov K.V., Murav'eva O.V., Myshkin Yu.V., et al. Modeling magnetic, electric, and acoustic fields of a pass-through transducer when testing cylindrical objects. *Russ. J. Nondestruct. Test.*, 2019, vol. 55, no. 2, pp. 102–110.  
DOI: <https://doi.org/10.1134/S1061830919020062>
- [6] Suchkov G.M., Migushchenko R.P., Kropachek O.Yu. A portable straight beam combined electromagnetic-acoustic transducer for ultrasonic testing through dielectric layers up to 20 mm thick on the surface of ferromagnetic metal products. *Defektoskopiya*, 2022, no. 5, pp. 13–23 (in Russ.). EDN: BLP CRM
- [7] Muzhitskii V.F., Remezov V.B., Komarov V.A. Fundamentals of electromagnetic-acoustic-transformation thickness measurements with attachable probes: 1. Direct electromagnetic-acoustic transformation in a normal polarizing field. *Russ. J. Nondestruct. Test.*, 2006, vol. 42, no. 10, pp. 667–681.  
DOI: <https://doi.org/10.1134/S1061830906100068>
- [8] Liu Y., Wang Y., Zhu L., et al. Optimal design of electromagnetic acoustic transducer used to generate lamb wave. *Sens. Transducers*, 2014, vol. 162, no. 1, pp. 29–37.
- [9] Kolpakov K.V., Myshkin Yu.V. [Influence of mechanical stress on the SH-waves propagation velocity in the steel plate]. *Priborostroenie v XXI veke – 2021. Integratsiya nauki, obrazovaniya i proizvodstva. Sb. mater. XVII Vseros. nauch.-tekhn. konf. [Instrumentation in the XXI Century – 2021. Integration of Science, Education and Production. Proc. Russ. Sc.-Tech. Conf.]*. Izhevsk, 2022, pp. 203–207 (in Russ.). EDN: QCJMDQ

- [10] Plesnetsov S.Yu., Suchkov G.M. Method of electromagnetic-acoustic monitoring of metal products without the “dead zone”. *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchiy kontrol*, 2018, no. 1, pp. 42–46 (in Russ.).
- [11] Muravyev V.V., ed. *Akusticheskaya tenzometriya i strukturoskopiya zheleznodorozhnykh koles* [Acoustic tensometry and structuroscopy of railway wheels]. Izhevsk, Kalashnikov ISTU Publ., 2014.
- [12] Myshkin A.V. Vliyanie konstruktivnykh parametrov mnogoelementnykh fazirovannykh preobrazovateley na formirovanie akusticheskikh poley. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Influence of design parameters of multi-element phased converters on the formation of acoustic fields. Abs. Diss. Cand. Sc. (Eng.)]. Izhevsk, Kalashnikov ISTU, 2015 (in Russ.).
- [13] Budenkov G.A., Nedzvetskaya O.V. *Dinamicheskie zadachi teorii uprugosti* [Dynamic problems of elasticity theory]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2004.
- [14] Ilyasov R.S. Elektromagnitno-akusticheskoe preobrazovanie v magnitouporyadchennykh tverdykh telakh. Diss. d-ra fiz.-mat. nauk [Electromagnetic-acoustic transformation in magnetically ordered solids. Diss. Dr. Sc. (Phys.-Math.)]. Izhevsk, Kalashnikov ISTU, 2002 (in Russ.).
- [15] Ilyin I.V. Issledovanie elektromagnitno-akusticheskogo metoda vozbuzhdeniya i priema voln Releya v ferromagnetikakh. Diss. kand. fiz.-mat. nauk [Investigation of the electromagnetic-acoustic method of excitation and reception of Rayleigh waves in ferromagnets. Diss. Cand. Sc. (Phys.-Math.)]. Leningrad, LETI, 1979 (in Russ.).
- [16] Ilyasov R.S., Babkin S.E., Komarov V.A. On the mechanisms of electromagnetic Rayleigh wave transformation in ferromagnets at different frequencies. *Defektoskopiya*, 1988, no. 10, pp. 77–82 (in Russ.).
- [17] Aleshin N.P., ed. *Metody akusticheskogo kontrolya metallov* [Methods of acoustic control of metals]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989.
- [18] Chabanov V.E., Zhukov V.A. Calculation and design of EMAT for ultra-sonic non-destructive testing. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Fiziko-matematicheskie nauki* [St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics], 2014, no. 3, pp. 57–73 (in Russ.). EDN: TBTF0V
- [19] Mushnikov A.N. Vliyanie obemnogo napryazhennogo sostoyaniya na magnitnye kharakteristiki konstruktsionnykh staley. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Influence of the volumetric stress state on the magnetic characteristics of structural steels. Abs. Diss. Cand. Sc. (Eng.)]. Ekaterinburg, IES RAS (Ural Branch), 2021 (in Russ.).
- [20] Aleshin N.P., Gobov Yu.L., Mikhaylov A.V., et al. Automated ultrasonic inspection of large diameter pipes. *Defektoskopiya*, 2014, no. 3, pp. 3–11 (in Russ.). EDN: SHORTJ
- [21] Remizov A.E. Povyshenie effektivnosti otsenki trub magistralnykh gazoprovodov s uchetom rezultatov stendovykh ispytaniy skanerov-defektoskopov. Diss. kand. tekhn. nauk [Improving efficiency of evaluating pipes of main gas pipelines taking into account the results of bench tests of flaw scanners. Diss. Cand. Sc. (Eng.)]. Moscow, Gazprom VNIIGAZ, 2015 (in Russ.).

**Syrkin M.M.** — Cand. Sc. (Eng.), Deputy Head, Design Department, “Welding and Testing” of MSTU n.a. Bauman (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Shchipakov N.A.** — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Welding, Diagnostics and Special Robotics, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Syrkin M.M., Shchipakov N.A. On the question of the ratio of the effectiveness of magnetic and magnetostrictive mechanisms of EMA transformation in ferromagnets in a normal magnetizing field. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2024, no. 6 (117), pp. 36–54 (in Russ.). EDN: BAGUJF