

К ВОПРОСУ О ПОВЫШЕНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОХОДНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПРОДОЛЬНЫХ ВОЛН

© 2023 г. О.В. Муравьева^{1,2,*}, Ю.В. Мышкин¹, А. А. Наговицын¹

¹ФГБОУ ВО Ижевский государственный технический университет имени
М.Т. Калашникова, Россия 426069 Ижевск, Студенческая, 7

²ФГБУН УдмФИЦ УрО РАН, Россия 426067 Ижевск, ул. Татьяны Барамзиной, 34

*E-mail: olgak166@mail.ru

Поступила в редакцию 13.02.2023; после доработки 17.02.2023

Принята к публикации 17.02.2023

Теоретически и экспериментально исследована возможность повышения эффективности проходных электромагнитно-акустических (ЭМА) преобразователей продольных волн при изменении направления тока в высокочастотном индукторе и формировании сонаправленного (противонаправленного) включения магнитного поля индуктора относительно поляризирующего поля постоянного намагничивания. Показано, что увеличение эффективности ЭМА-преобразования за счет электродинамического механизма обусловлено локальным увеличением плотности вихревых токов по краям апертуры высокочастотного индуктора при противонаправленном включении магнитного поля. Указанные закономерности проявляются наиболее явно для образцов с высокой магнитной проницаемостью.

Ключевые слова: проходной электромагнитно-акустический преобразователь, эффективность, моделирование.

DOI: 10.31857/S0130308223030016, EDN: OQZWK

ВВЕДЕНИЕ

Высокий интерес научного и промышленного сообщества к использованию бесконтактных электромагнитно-акустических (ЭМА) преобразователей обусловлен их неоспоримыми достоинствами: в частности, возможность контроля через воздушный зазор без применения контактных жидкостей, в том числе в условиях высоких температур; отсутствие износа ЭМА-преобразователей; независимость результатов контроля от перекосов преобразователей относительно поверхности объекта и от наличия на поверхности изделия ржавчины, окислы, краски, загрязнений; возможность возбуждения и приема любых типов волн [1], в том числе поперечных с горизонтальной поляризацией, которые практически невозможно возбудить и принять контактным способом. Бесконтактные ЭМА-преобразователи широко используются в задачах волноводного контроля труб и листов с использованием волн Лэмба, волн горизонтальной поляризации [2—4] и волн Релея [5—8], а также пруткового проката и изделий с использованием волн Похгаммера [9]. В большинстве случаев ЭМА-методы с использованием высокочастотных поперечных и рэлеевских волн реализуют методики акустической толщинометрии [10—12], структуроскопии (контроль физико-механических свойств) [13—16], оценке накопления повреждений, анизотропии свойств и напряженно-деформированного состояния [17—19].

Возможности повышения эффективности ЭМА-преобразователей связаны, как правило, с увеличением поля внешнего подмагничивания, силы тока высокочастотного индуктора, модификации конструкций преобразователей [20—26]. Имеются сведения об использовании ЭМА-преобразователей в качестве фазированных решеток [27, 28]. Использование электромагнитно-акустических преобразователей (ЭМАП) проходного типа является одним из эффективных способов решения задач неразрушающего контроля, связанных с металлическими изделиями цилиндрической формы [29—31]. Излучение—прием продольных волн в ферромагнитных материалах с помощью ЭМА-преобразователей осложняется наличием двух механизмов преобразования (магнитострикционного и электродинамического), сложностью формирования тангенциальной составляющей поля в приповерхностном слое в зоне действия вихревых токов, а также более высокими упругими модулями среды, характеризующими распространение продольных волн (постоянные Ламе), а, следовательно, более низкими амплитудами смещений [32]. В случае проходного ЭМА-преобразователя продольных волн появляется возможность повышения эффективности за счет дополнительного воздействия магнитным полем, создаваемым импульсным током индуктора. При этом принципиальным является направление действия тока, создающее сонаправленное или противоположно направленное магнитное поле по отношению к внешнему полю подмагничивания, а также магнитные свойства объекта контроля.

Цель работы: изучить возможности повышения эффективности проходных электромагнитно-акустических преобразователей продольных волн за счет дополнительного воздействия магнитным полем, создаваемым в момент протекания электрического тока в высокочастотном индукторе, в условиях сонаправленного и противонаправленного включения магнитного поля относительно поля системы постоянного намагничивания, осуществляемого посредством электрической перекоммутации высокочастотного индуктора.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При исследовании возможностей повышения эффективности проходного электромагнитно-акустического преобразователя продольных волн применен зеркально-теневой электромагнитно-акустический метод контроля [36] с использованием многократных отражений, реализованный с использованием экспериментальной установки, структурная схема которой приведена на рис. 1. Технические характеристики экспериментальной установки показаны в табл. 1.

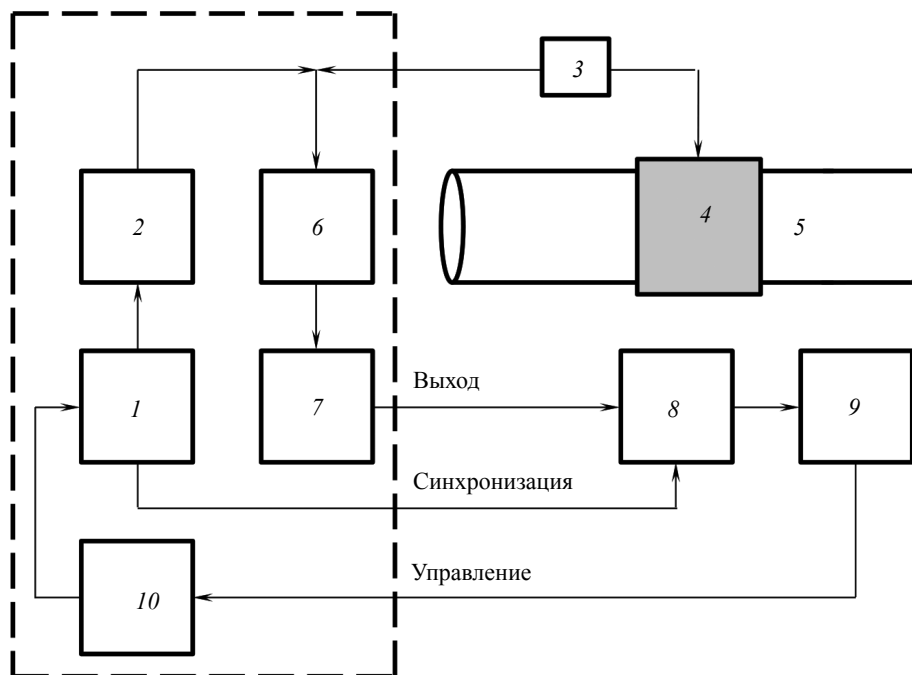


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки:

1 — генератор синхрипульсов; 2 — генератор зондирующих импульсов; 3 — коммутатор; 4 — проходной ЭМА-преобразователь; 5 — образец; 6 — полосовой фильтр; 7 — высокочастотный усилитель; 8 — аналого-цифровой преобразователь; 9 — ПК; 10 — блок управления.

Таблица 1

Технические характеристики экспериментальной установки

Амплитуда зондирующего импульса	до 1,5 кВ
Коэффициент усиления	80 дБ
Уровень шумов в рабочей полосе частот	50 мкВ
Рабочая частота, МГц	2,5
Частота дискретизации	100 МГц

Принцип действия проходного ЭМА-преобразователя продольных волн представлен на рис. 2. Преобразователь состоит из постоянного кольцевого магнита (или набора магнитов) с осевой поляризацией, двух концентраторов магнитного поля в виде ферромагнитных металлических

шайб и проходной цилиндрической катушки индуктивности, размещенной в зоне действия осевой компоненты магнитного поля в пространстве между объектом контроля и магнитом. Между поверхностью объекта и индуктором и между поверхностью объекта и постоянным магнитом имеются конструктивные зазоры.

Для указанной конструкции проходного преобразователя характерно одновременное излучение продольных упругих волн из каждой точки на поверхности объекта, расположенной под индуктором. Таким образом, продольные волны распространяются во всех радиальных направлениях в поперечном сечении объекта (см. рис. 2). Многократно переотраженные по диаметру объекта импульсы акустической волны принимаются тем же преобразователем за счет обратного взаимодействия, при котором высокочастотным индуктором регистрируются электромагнитные поля, порождаемые колебаниями приповерхностного слоя объекта.

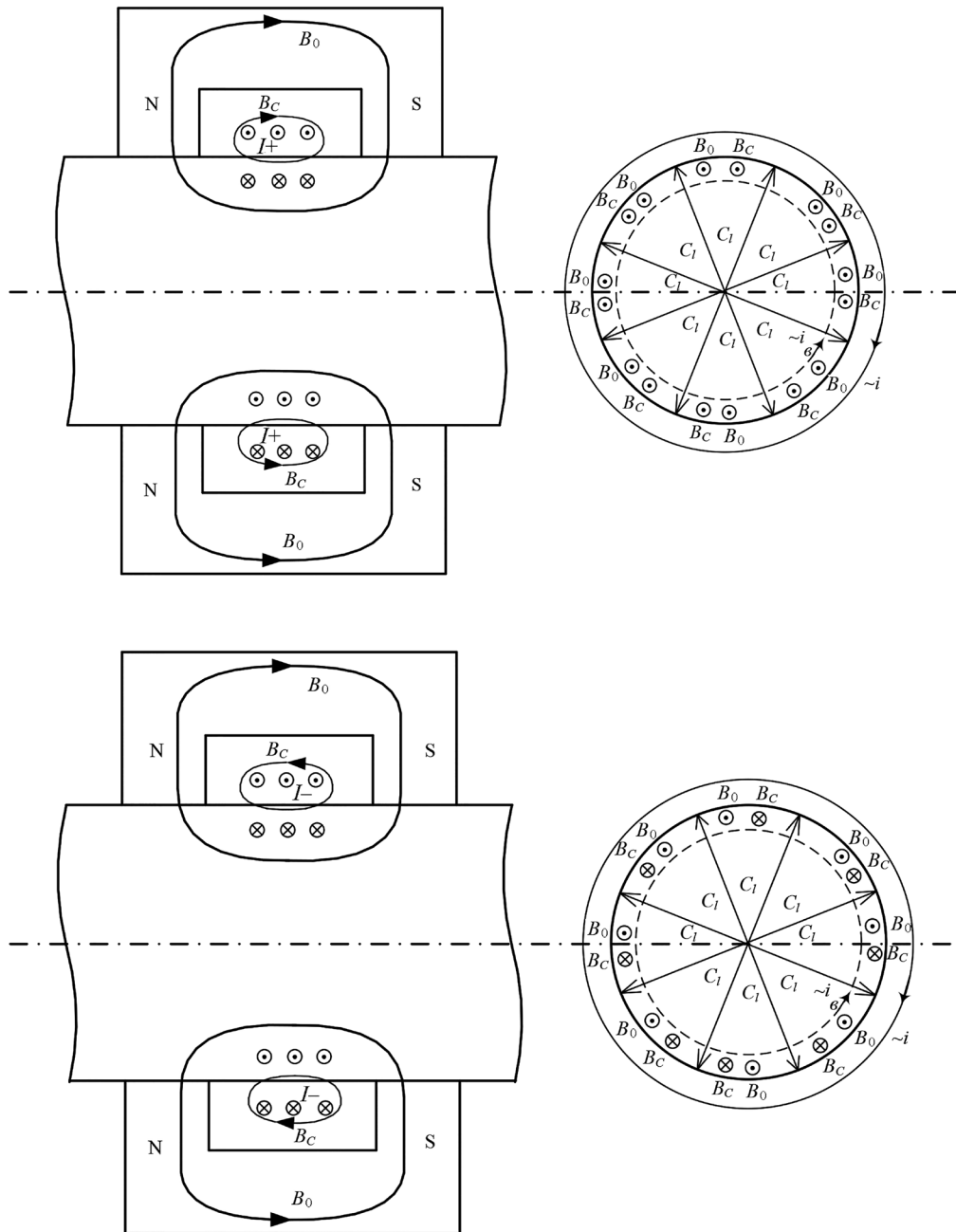


Рис. 2. Принцип действия проходного ЭМА-преобразователя продольных волн.

При использовании аperiодического импульса возбуждения можно допустить, что магнитное поле и поле вихревых токов формируется током одной полярности. Анализировались осциллограммы серии многократных отражений при сонаправленном и противонаправленном включении магнитного поля по отношению к полю системы постоянного подмагничивания, осуществляемого посредством электрической перекоммутации высокочастотного индуктора.

Эффективность ЭМА-преобразователя продольных волн исследована на цилиндрических образцах диаметром 14 мм из стали 40X (C — 0,38—0,43 %, Cr — 0,7—0,9 %, Mn — 0,7—0,9 %, Si — 0,15—0,30 %, S ≤ 0,04 %, P ≤ 0,035 %) с различной температурой отпуска образцов после закалки, в существенной мере оказывающей влияние на магнитные свойства стали (табл. 2) [33—35].

Таблица 2

Режимы термообработки и коэрцитивная сила образцов стали 40X

№ образца	Режимы термообработки	Коэрцитивная сила H_c , А/см
#1	Закалка в масле (855°C, 35 мин) Отпуск 570°C, 1 ч на воздухе	22
#2	Закалка в масле (855°C, 35 мин) Отпуск 220°C, 1 ч на воздухе	27

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве примера на рис. 3 приведены характерные осциллограммы серии импульсов многократных отражений продольной волны по диаметру объекта с различными режимами термообработки для различных вариантов включения.

Для исследованных образцов наблюдается увеличение амплитуд в серии импульсов многократных переотражений в условиях противонаправленного включения магнитного поля высокочастотного индуктора и постоянного магнитного поля. Наиболее существенный рост имеет место для

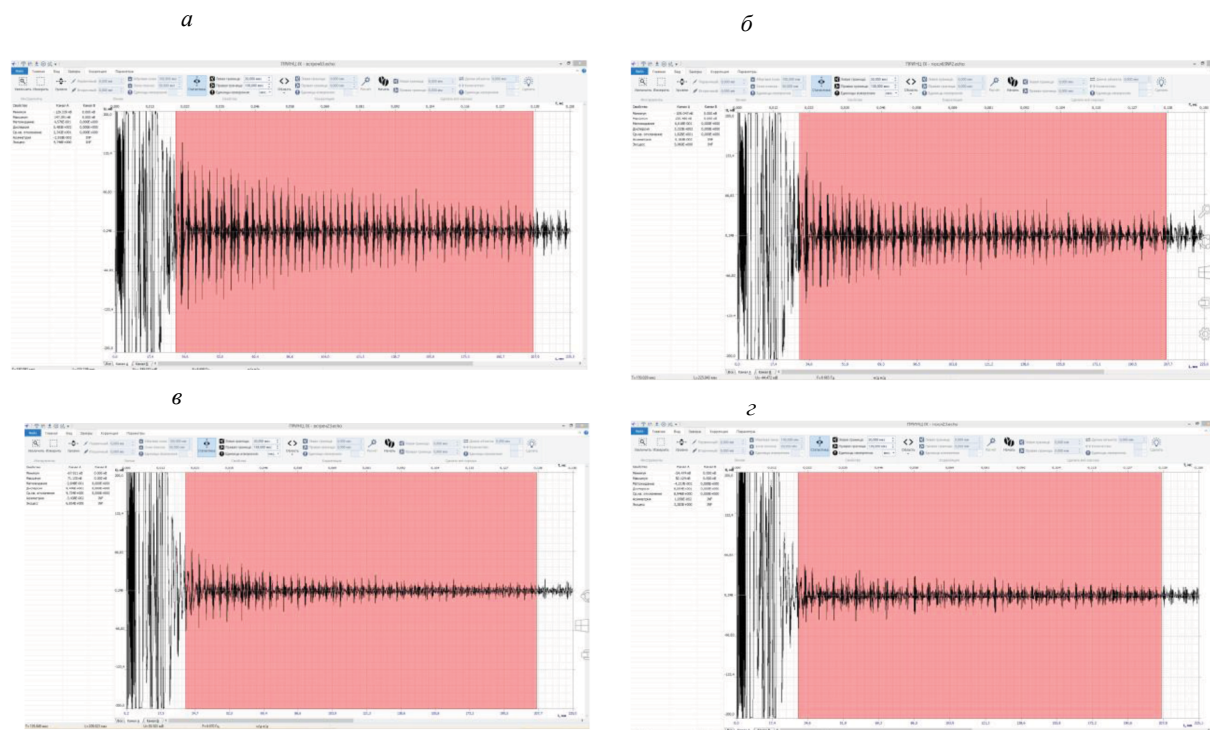


Рис. 3. Осциллограммы серии многократных отражений продольной волны по диаметру объекта при противонаправленном (а, в) и сонаправленном (б, г) включениях магнитного поля для образца #1 (а, б), образца #2 (в, г).

образцов с высокой температурой отпуска. Амплитуда сигнала меняется несущественно для образца после закалки и низкотемпературного отпуска.

Экспериментальную эффективность ЭМА-преобразования в условиях сонаправленного и противонаправленного включений магнитного поля оценивали как величину дисперсии D_x в серии многократных отражений, представляемых в виде последовательности данных в массиве x_n , определяемых диаметром объекта и числом анализируемых отражений $N=50$ импульсов, характеризующей рассеивание значений относительно математического ожидания m_x [30]:

$$D_x = \frac{1}{N-1} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} (x_n - m_x)^2. \quad (1)$$

Во избежание влияния на результаты анализа зондирующего импульса соответствующий ему интервал времени удалялся из анализируемого массива (рис. 3).

С целью сравнения эффективности ЭМА-преобразования для образцов с различной термообработкой и во избежание влияния на результат затухания в образце оценивали величину среднего значения амплитуд первых четырех импульсов вне мертвой зоны.

Результаты сравнительной оценки эффективности ЭМА-преобразования для образцов с различной термообработкой при сонаправленном и противонаправленном включении поля приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты оценки эффективности ЭМА-преобразования образцов с различной термообработкой при сонаправленном и противонаправленном включении магнитного поля

№ образца	Дисперсия D_x серии многократных отражений, мВ ²		Соотношение, раз	Среднее значение напряжения U_{cp} на выходе усилителя, мВ		Соотношение, раз
	Сонаправленное включение магнитного поля	Противонаправленное включение магнитного поля		Сонаправленное включение магнитного поля	Противонаправленное включение магнитного поля	
#1	548	333	1,64	71	107	1,49
#2	80,0	94,8	1,18	31	27,4	1,14

Видно, что увеличение температуры отпуска ведет к росту эффективности ЭМА-преобразования, при этом увеличивается разница между средними значениями амплитуды эхоимпульсов при сонаправленном и противонаправленном включении магнитного поля.

Увеличение эффективности ЭМА-преобразования (амплитуды импульсов в серии многократных отражений) за счет электродинамического механизма может быть обусловлено как увеличением индукции магнитного поля в момент протекания электрического тока в индукторе, так и плотности вихревых токов, наводимых в объекте. При этом предполагается, что эффект увеличения плотности тока вносит наибольший вклад, поскольку претерпевает наибольшие изменения при изменении направления тока и существенно зависит от гистерезиса магнитных свойств ферромагнитного образца.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ЭМА-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Анализ акустических и электромагнитных полей ЭМА-преобразователей ведется, как правило, с использованием численных методов [36—39]. С целью подтверждения результатов экспериментального исследования проведено моделирование электромагнитного поля ЭМА-преобразователя численным методом в программной среде Comsol Multiphysics и модуля AC/DC.

Задача решена в двумерной осесимметричной постановке. Двумерная геометрическая модель проходного ЭМА-преобразователя с объектом контроля включает: цилиндрический образец из стали 40X диаметром 14 мм, систему подмагничивания, состоящую из кольцевого неодимового магнита класса N52 с осевой поляризацией и двух ферромагнитных концентраторов в виде колец, трапецеидальных на верхней поверхности, с целью уменьшения размагничивающего фактора. В зазоре между объектом и неодимовым магнитом на расстоянии 0,5 мм от цилиндрической поверхности образца располагался высокочастотный индуктор, выполненный в виде 10 витков медной проволоки диаметром 0,4 мм, шириной намотки 10 мм. Функция, описывающая импульс тока намагничивания, представлена однополярным импульсом (рис. 4а) с основной частотой в спектре

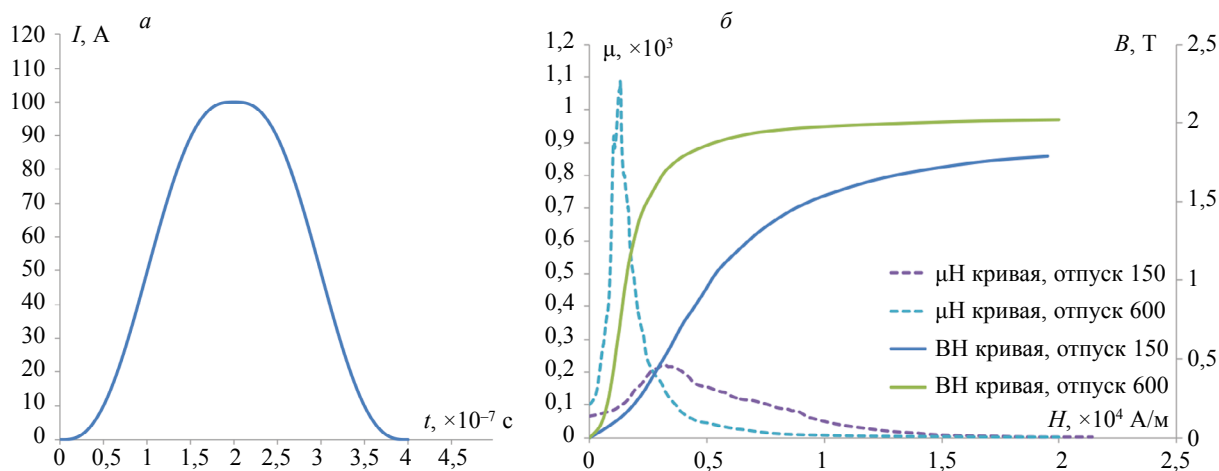


Рис. 4. Вид тока намагничивания (а), кривые намагничивания и магнитной проницаемости для стали 40Х при различной температуре отпуска (б).

2,5 МГц, током в индукторе 10 А. При этом исследовали два случая однополярного импульса тока, подаваемого на высокочастотный индуктор: с положительным ($I+$) и отрицательным ($I-$) значением тока. В случае положительного значения тока $I+$, подаваемого на высокочастотный индуктор и направленного по часовой стрелке, на поверхности образца наводятся вихревые токи, ориентированные против часовой стрелки. При этом создается дополнительное магнитное поле, сонаправленное с магнитным полем системы подмагничивания. И, наоборот, при отрицательном токе в высокочастотном индукторе ($I-$), направленном против часовой стрелки, создаваемое индуктором магнитное поле будет иметь противоположное направление с магнитным полем системы подмагничивания. Здесь и далее обозначение тока $I+$ будет использоваться для описания сонаправленного направления магнитных полей системы подмагничивания и тока индуктора, $I-$ — для описания противоположного направлений (табл. 4).

Таблица 4

Условные обозначения решаемых задач

Параметр	Условное обозначение
Сонаправленное включение магнитного поля	$I+$
Противонаправленное включение магнитного поля	$I-$
Отпуск 150 °С	T150
Отпуск 600 °С	T600
Сонаправленное включение магнитного поля, отпуск 150 °С	T150 $I+$ (вариант 1)
Сонаправленное включение магнитного поля, отпуск 600 °С	T600 $I+$ (вариант 2)
Противонаправленное включение магнитного поля, отпуск 150 °С	T150 $I-$ (вариант 3)
Противонаправленное включение магнитного поля, отпуск 600 °С	T600 $I-$ (вариант 4)

Моделирование проведено для образцов стали 40Х с температурой отпуска 150 °С и 600 °С (обозначения M150 и M600 соответственно). В качестве примера на рис. 4б представлены кривые намагничивания и дифференциальной магнитной проницаемости стали 40Х при различных температурах отпуска [40]. Видно, что максимальное значение дифференциальной магнитной проницаемости меняется от 1090 до 220, а поле насыщения — от 2 до 1,7 Т при уменьшении температуры отпуска после закалки.

В ходе моделирования исследовались поля вихревых токов, формируемых высокочастотным индуктором, и магнитные поля системы подмагничивания в динамическом режиме (в условиях дополнительного воздействия током высокочастотного индуктора) при сонаправленном и противонаправленном подключениях индуктора, формируемые в цилиндрических образцах стали 40Х с различными магнитными свойствами.

Распределение осевой B_z составляющей магнитной индукции в момент времени, соответствующий максимальному значению плотности вихревых токов, представлен на рис. 5а. Зависимость осевой компоненты индукции от радиуса прутка по центру высокочастотного индуктора ($r = 0$ мм) не имеет существенных отклонений для различных исследуемых вариантов. Однако под краем индуктора наблюдается более существенное уменьшение магнитной индукции. Так, в случае варианта 4 (Т600 I–) в условиях противонаправленного включения магнитного поля для образца с высокотемпературным отпуском осевая компонента магнитной индукции B_z уменьшается на 67 % по сравнению с вариантом 2 сонаправленного включения. При этом на глубине скин-слоя наблюдается выравнивание осевой компоненты магнитного поля вдоль поверхности.

Распределение вихревых токов в момент времени, соответствующий максимальной амплитуде вихревых токов, представлено на рис. 5б. Наиболее равномерное распределение вихревых токов вдоль поверхности наблюдается для варианта 1 (образец с низкой температурой отпуска при сонаправленном включении). В варианте 4 для образца с высокой температурой отпуска при противонаправленном включении максимум вихревых токов концентрируется на поверхности под краями индуктора в точке z_c , при этом на глубине скин-слоя зона перемещается в середину апертуры индуктора z_c . Чем выше магнитная проницаемость образца, тем уже поле вихревых токов на глубине скин-

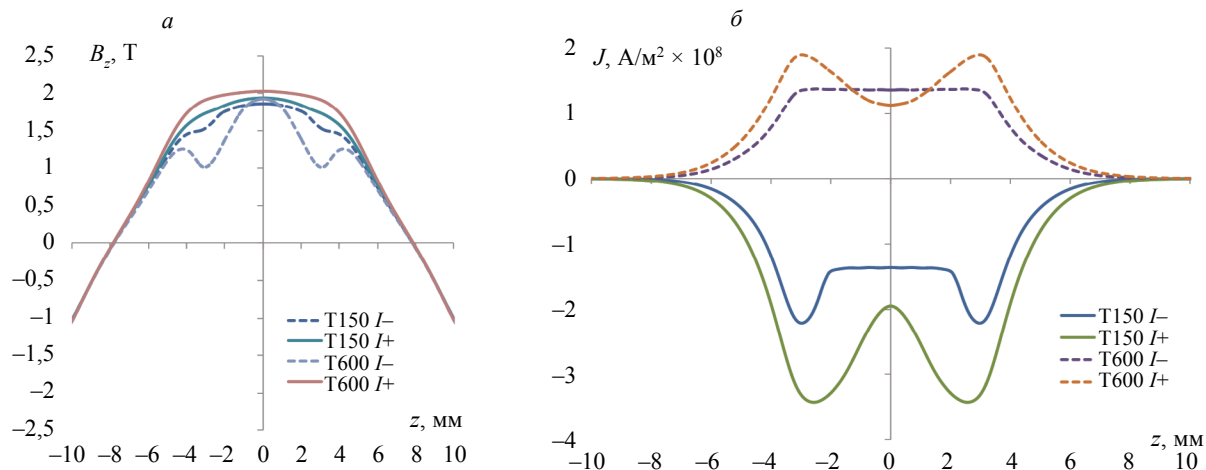


Рис. 5. Распределение осевой B_z составляющей магнитной индукции (а) и плотности вихревых токов (б) на поверхности объекта в момент времени, соответствующий максимальному значению плотности вихревых токов.

Таблица 5

Величина скин-слоя δ по центру и по краю индуктора

Положение относительно центра индуктора	δ , мкм (вариант 1)	δ , мкм (вариант 2)	δ , мкм (вариант 3)	δ , мкм (вариант 4)
$z_c = 0$ мм	68,0	91,3	67,6	39,8
$z_c = 3,15$ мм	64,0	32,4	24,0	9,2

слоя.

Распределение плотности вихревых токов по глубине (радиусу цилиндра), начиная от его поверхности, в моменты времени, соответствующие максимальному значению плотности вихревых токов, имеют вид экспоненциальных зависимостей, характерных для закона ослабления вихревых токов с глубиной (рис. 6). При этом показатель экспоненты, характеризующий глубину скин-слоя, различен для различных режимов термообработки и вариантов включения индуктора, а также зоны индуктора (по центру и краю). Значения глубины скин-слоя δ , определяемые расстоянием, на котором выполняется условие уменьшения плотности тока в e раз, по сравнению с мак-

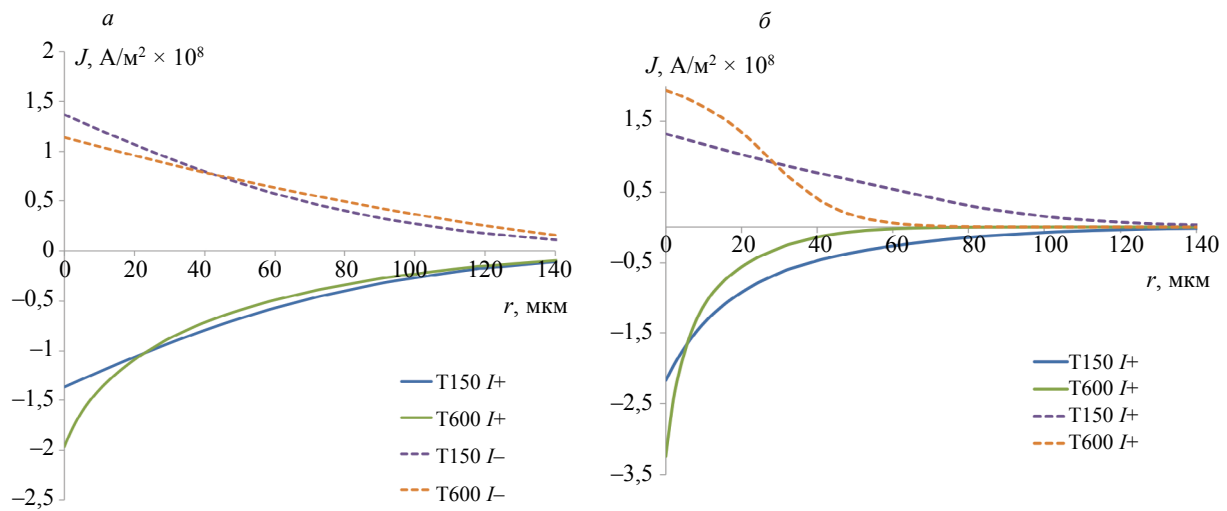


Рис. 6. Распределение плотности вихревых токов по радиусу объекта по центру z_c (а) и по краю z_e (б) в момент времени, соответствующий максимальному значению плотности вихревых токов.

симальным значением на поверхности, указаны в табл. 5.

Видно, что минимальное значение скин-слоя соответствует варианту 4 (Т600 I–), при этом плотность тока максимальна. Максимальное значение скин-слоя и минимальное значение плотности наблюдается для варианта 2 (Т600 I+). При этом для вариантов 1 и 3 для низкотемпературного отпуска скин-слой практически не изменяется. Следует отметить, что по краю индуктора различие в глубине скин-слоя и амплитудах вихревых токов более существенно. Существенные различия в указанных зависимостях объясняются различиями в магнитной проницаемости и концентрацией вихревых токов на участках объекта с резким изменением индукции магнитного поля. Наличие зон концентрации вихревых токов под краями индуктора связано с более высокой магнитной проницаемостью и не противоречит закону Фарадея.

Для оценки объемной плотности пондеромоторных сил, характеризующих эффективность ЭМА-преобразования, проведена интегральная оценка средних по апертуре преобразователя значений магнитной индукции и плотности вихревых токов в момент времени, соответствующий

Таблица 6

Результаты оценки средних по апертуре преобразователя значений магнитной индукции, плотности вихревых токов и объемной плотности пондеромоторных сил

Характеристика	Направление тока и температура отпуска				Отношение, раз	Отношение, раз
	I–		I+			
	T150	T600	T150	T600	T150	T600
Магнитная индукция, Т	–1,62	–1,53	1,71	1,82	0,95	0,84
Плотность вихревых токов, ×10 ⁹ А/м ²	–0,128	–0,215	0,116	0,118	1,1	1,82
Объемная плотность сил, ×10 ⁹ Н/м ³	0,208	0,329	0,198	0,216	1,05	1,52

максимуму амплитуды вихревых токов (табл. 6).

Рассчитанные значения соотношений плотности пондеромоторных сил для вариантов сонаправленного и противоположного включений в образцах с различной температурой отпуска показывают удовлетворительное согласование с результатами экспериментальных исследований (см. табл. 1) и говорят об адекватности предложенной модели описания полей проходного электромагнитно-акустического преобразователя продольных волн.

ВЫВОДЫ

Таким образом, теоретически и экспериментально исследована возможность повышения эффективности проходных электромагнитно-акустических преобразователей продольных волн в образцах стали 40Х с различной термообработкой за счет дополнительного воздействия магнитным полем, создаваемым в момент протекания электрического тока в высокочастотном индукторе, в условиях сонаправленного и противонаправленного включения магнитного поля относительно поля системы постоянного намагничивания, осуществляемого посредством электрической перекоммутации высокочастотного индуктора.

Показано, что увеличение эффективности ЭМА-преобразования за счет электродинамического механизма обусловлено в первую очередь увеличением плотности вихревых токов, наводимых в объекте при противонаправленном включении магнитного поля, что объясняется концентрацией вихревых токов по краям апертуры высокочастотного индуктора и связано с резким изменением индукции магнитного поля в данной области. Указанные закономерности проявляются наиболее явно для образцов с низкой температурой отпуска (высокой магнитной проницаемостью).

Степень влияния магнитного поля высокочастотного индуктора на эффективность ЭМА-преобразования может отличаться для сталей различных марок и их магнитных свойств, а также зависит от конструктивных особенностей ЭМА-преобразователя с точки зрения формирования поля подмагничивания (его равномерности) в зоне действия вихревых токов.

Таким образом, при проектировании ЭМА-преобразователей с высокой эффективностью требуется анализ совместного влияния магнитного поля системы подмагничивания и высокочастотного индуктора в материале объекта контроля с данными магнитными свойствами.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00252, <https://rscf.ru/project/22-19-00252/> с использованием УНУ «Информационно-измерительный комплекс для исследований акустических свойств материалов и изделий» (рег. номер: 586308).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hirao M., Ogi H. *Electromagnetic Acoustic Transducers*. Springer. 2017. P. 360. DOI: 10.1007/978-4-431-56036-4
2. Liu T., Jin Y., Pei C., Han J., Chen Z. A compact guided-wave EMAT with pulsed electromagnet for ferromagnetic tube inspection // *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*. 2020. V. 64. No. 1—4. P. 951—958. DOI: 10.3233/JAE-209409
3. Munoz C.Q.G., Jimenez A.A., Marquez F.P.G., Kogia M., Cheng L., Mohimi A., Papaelias M. Cracks and Welds Detection Approach in Solar Receiver Tubes Employing EMATs // *Structural Health Monitoring*. 2017. <https://doi.org/10.1177/1475921717734501>
4. Муравьева О.В., Муравьев В.В. Методические особенности использования SH-волн и волн Лэмба при оценке анизотропии свойств листового проката // *Дефектоскопия*. 2016. № 7. С. 3—11.
5. Aleshin N.P., Krysko N.V., Kusyy A.G., Skrynnikov S.V., Mogilner L.Yu. Investigating the Detectability of Surface Volumetric Defects in Ultrasonic Testing with the Use of Rayleigh Waves Generated by an Electromagnetic-Acoustic Transducer // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2022. V. 57. No. 5. P. 361—368. [Алешин Н.П., Крысько Н.В., Кусый А.Г., Скрынников С.В., Могильнер Л.Ю. Исследование выявляемости поверхностных объемных дефектов при ультразвуковом контроле с применением волн Рэлея, генерируемых электромагнитно-акустическим преобразователем // *Дефектоскопия*. 2021. № 5. С. 22—30. DOI: 10.31857/S0130308221050031]
6. Aleshin N.P., Krysko N.V., Skrynnikov S.V., Kusyy A.G. Studying Detectability of Plane Surface Defects by Ultrasonic Method Using Rayleigh Waves // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2021. V. 57. No. 6. P. 446—454. [Алешин Н.П., Крысько Н.В., Скрынников С.В., Кусый А.Г. Исследование выявляемости поверхностных плоскостных дефектов ультразвуковым методом с применением волн Рэлея // *Дефектоскопия*. 2021. № 6. С. 26—34. DOI: 10.31857/S0130308221060038]
7. Муравьев В.В., Гущина Л.В., Казанцев С. Оценка накопленной поврежденности шеек осей колесных пар вагонов ультразвуковым методом с использованием рэлеевских и головных волн // *Дефектоскопия*. 2019. № 10. С. 14—23. DOI: 10.1134/S0130308219100026
8. Муравьева О.В., Волкова Л.В., Муравьев В.В., Синцов М.А., Мышкин Ю.В., Башарова А.Ф. Чувствительность электромагнитно-акустического метода многократной тени с использованием рэлеевских волн при контроле труб нефтяного сортамента // *Дефектоскопия*. 2020. № 12. С. 48—57. DOI: 10.31857/S0130308220120052.
9. Муравьева О.В., Муравьев В.В., Стрижак В.А., Мурашов С.А., Пряхин А.В. Акустический волноводный контроль линейно-протяженных объектов. Издательство Сибирского отделения РАН, 2017.

С. 234.

10. *Karayeva S.D., Bergander M.J., Vakhguel't A., Khairaliyev S.* Remaining life assessment for boiler tubes affected by combined effect of wall thinning and overheating // *Journal of Vibroengineering*. 2017. V. 19. No. 8. P. 5892—5907. DOI: 10.21595/jve.2017.18219

11. *Аишихин Д.С., Федоров А.В.* Исследование влияния параметров электромагнитно-акустического преобразователя на точность измерения толщины изделий // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2022. Т. 22. № 2. С. 376—384. DOI: 10.17586/2226-1494-2022-22-2-376-384

12. *Сучков Г.М., Мигущенко Р.П., Кропачев О.Ю., Плеснецов С.Ю., Билык З.В., Хорошайло Ю.Е., Ефименко С.А., Салам Б.* Бесконтактный спектральный экспресс-способ обнаружения коррозионных повреждений металлоизделий // *Дефектоскопия*. 2020. № 1. С. 14—21. DOI: 10.31857/S0130308220010029

13. *Бабкин С.Э.* Определение скорости основных типов акустических волн в металлах приставным датчиком // *Дефектоскопия*. 2020. № 4. С. 32—39. DOI: 10.31857/S0130308220040041

14. *Murav'eva O., Murav'ev V., Volkova L., Kazantseva N., Nichipuruk A., Stashkov A.* Acoustic properties of low-carbon 2% Mn-doped steel manufactured by laser powder bed fusion technology // *Additive Manufacturing*. 2022. V. 51. P. 102635. DOI: 10.1016/j.addma.2022.102635

15. *Федорова Н.В., Леньков С.В.* Исследование магнитоупругих свойств аморфно-кристаллического сплава $Fe_{73.7}Cu_{1.0}Nb_{3.2}Si_{12.7}B_{9.4}$ и методика эксперимента при использовании электромагнитно-акустического преобразования // *Химическая физика и мезоскопия*. 2020. Т. 22. № 4. С. 448—457. DOI: 10.15350/17270529.2020.4.42

16. *Муравьев В.В., Будрин А.Ю., Синцов М.А.* Влияние циклически изменяющихся нагрузок на скорости сдвиговых и Рэлеевских волн в стальных прутках разной термической обработки // *Интеллектуальные системы в производстве*. 2020. Т. 18. № 4. С. 4—10. DOI: 10.22213/2410-9304-2020-4-10

17. *Волкова Л.В., Муравьева О.В., Муравьев В.В.* Неравномерность акустической анизотропии толстолистового стального проката // *Сталь*. 2021. № 5. С. 36—41.

18. *Булдакова И.В., Волкова Л.В., Муравьев В.В.* Распределение напряжений в образцах труб магистральных газопроводов со сварным соединением // *Интеллектуальные системы в производстве*. 2020. Т. 18. № 1. С. 4—8. DOI: 10.22213/2410-9304-2020-1-4-8

19. *Муравьев В.В., Муравьева О.В., Будрин А.Ю., Синцов М.А., Зорин А.В.* Акустическая структуроскопия стальных образцов, нагруженных изгибом с вращением при испытаниях на усталость // *Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова*. 2019. Т. 22. № 1. С. 37—44. DOI: 10.22213/2413-1172-2019-1-37-44

20. *Liu Z., Deng L., Zhang Y., Li A., Bin W., He C.* Development of an omni-directional magnetic-concentrator-type electromagnetic acoustic transducer // *NDT & E International*. 2020. V. 109. P. 102193. DOI: 10.1016/j.ndteint.2019.102193

21. *Сучков Г.М., Мигущенко Р.П., Кропачев 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. DOI: 10.31857/S0130308222050025

22. *Злобин Д.В., Муравьева О.В.* Особенности построения аппаратуры электромагнитно-акустической дефектоскопии пруткового проката с использованием стержневых волн // *Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова*. 2012. № 4 (56). С. 99—104.

23. *Rieger K., Erni D., Rueter D.* Noncontact reception of ultrasound from soft magnetic mild steel with zero applied bias field EMATs // *NDT & E International*. 2022. V. 125. P. 102569. DOI: 10.1016/j.ndteint.2021.102569

24. *Ren W., He J., Dixon S., Xu K.* Enhancement of EMAT's efficiency by using silicon steel laminations back-plate // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2018. V. 274. P. 189—198. DOI: 10.1016/j.sna.2018.03.010

25. *Xiang L., Dixon S., Thring C.B., Li Z., Edwards R.S.* Lift-off performance of electromagnetic acoustic transducers (EMATs) for surface acoustic wave generation // *NDT & E International*. 2022. V. 126. P. 102576. DOI: 10.1016/j.ndteint.2021.102576

26. *Tu J., Zhong Z., Song X., Zhang X., Deng Z., Liu M.* An external through type RA-EMAT for steel pipe inspection // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2021. V. 331. P. 113053. DOI: 10.1016/j.sna.2021.113053

27. *Liu H., Liu T., Yang P., Liu Y., Gao S., Li Y., Li T., Waang Y.* Design and experiment of array Rayleigh wave-EMAT for plane stress measurement // *Ultrasonics*. 2022. V. 120. P. 106639. DOI: 10.1016/j.ultras.2021.106639

28. *Tkocz J., Greenshields D., Dixon S.* High power phased EMAT arrays for nondestructive testing of as-cast steel // *NDT & E International*. 2019. V. 102. P. 47—55. DOI: 10.1016/j.ndteint.2018.11.001

29. *Муравьев В.В., Муравьева О.В., Петров К.В.* Связь механических свойств пруткового проката из стали 40Х со скоростью объемных и рэлеевских волн // *Дефектоскопия*. 2017. № 8. С. 20—28.

30. *Murav'eva O.V., Brester A.F., Murav'ev V.V.* Comparative Sensitivity of Informative Parameters of Electromagnetic-Acoustic Mirror-Shadow Multiple Reflections Method during Bar Stock Testing // *Russian*

Journal of Nondestructive Testing. 2022. V. 58. No. 8. P. 689—704. [Муравьева О.В., Брестер А.Ф., Муравьев В.В. Сравнительная чувствительность информативных параметров электромагнитно-акустического зеркально-теневоего метода на многократных отражениях при контроле пруткового проката // Дефектоскопия. 2022. № 8. С. 36—51.]

31. Муравьева О.В., Муравьев В.В., Кокорина Е.В., Лойферман М.А. Реальная чувствительность входного акустического контроля прутков-заготовок при производстве пружин // В мире неразрушающего контроля. 2013. № 1 (59). С. 52—60.

32. Буденков Г.А., Недзвецкая О.В. Динамические задачи теории упругости в приложении к проблемам акустического контроля и диагностики. М.: ООО Издательская фирма «Физико-математическая литература», 2004. 135 с. ISBN 5-94052-061-X.

33. Костин В.Н., Василенко О.Н., Сандомирский С.Г. Структурная чувствительность параметров несимметричного цикла «коэрцитивный возврат—намагничивание» термообработанных низкоуглеродистых сталей // Дефектоскопия. 2018. № 11. С. 36—42. DOI: 10.1134/S0130308218110052

34. Stashkov A.N., Schapova E.A., Nichipuruk A.P., Korolev A.V. Magnetic incremental permeability as indicator of compression stress in low-carbon steel // NDT & E International. 2021. V. 118. P. 102398. DOI: 10.1016/j.ndteint.2020.102398

35. Serbin E.D., Kostin V.N., Vasilenko O.N., Ksenofontov D.G., Gerasimov E.G., Terentev P.B. Influence of the two-stage plastic deformation on the complex of the magnetoacoustic characteristics of low-carbon steel and diagnostics of its structural state // NDT & E International. 2020. V. 116. P. 102330. DOI: 10.1016/j.ndteint.2020.102330

36. Wang S., Kang L., Li Z., Zhai G., Zhang L. 3-D modeling and analysis of meander-line-coil surface wave EMATs // Mechatronics. 2012. V. 22. No. 6. P. 653—660. DOI: 10.1016/j.mechatronics.2011.04.001

37. Муравьева О.В., Петров К.В. Акустическое поле, формируемое в условиях импульсного излучения—приема на поверхности эллиптического цилиндра // Акустический журнал. 2019. Т. 65. № 1. С. 110—119. DOI: 10.1134/S0320791919010064

38. Plesnetsov S.Yu., Petrishchev O.N., Mygushchenko R.P., Suchkov G.M. Simulation of electromagnetic-acoustic conversion process under torsion waves excitation. part 2 // Technical Electrodynamics. 2018. № 1. P. 30—36. DOI: 10.15407/techned2018.01.030

39. Li Y., Liu Z., Miao Y., Yuan W., Liu Z. Study of a spiral-coil EMAT for rail subsurface inspection // Ultrasonics. 2020. V. 108. P. 106169. DOI: 10.1016/j.ultras.2020.106169

40. Сандомирский С.Г. Использование параметров предельной петли гистерезиса для синтеза структурочувствительных магнитных параметров сталей // Контроль. Диагностика. 2017. № 11. С. 26—31. DOI: 10.14489/td.2017.11.pp.026-031