

УДК 620.179.16

DOI 10.22213/2413-1172-2018-2-135-146

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРОХОДНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НА РЕЗУЛЬТАТЫ КОНТРОЛЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

К. В. Петров, аспирант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

М. Ю. Соков, аспирант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

О. В. Муравьева, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова; Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Ижевск, Россия

Исследовано влияние конструктивных особенностей проходного электромагнитно-акустического (ЭМА) преобразователя, связанных с влиянием взаимного расположения высокочастотного индуктора и системы намагничивания, на его акустическую помехозащищенность и результаты формирования серии многократных отражений. Для оценки соотношения амплитуд основной поперечной и нежелательной продольной типов волн и закономерностей их появления в зависимости от местоположения высокочастотного индуктора проведено конечно-элементное моделирование системы подмагничивания проходного ЭМА-преобразователя в программной среде COMSOL Multiphysics. Показано, что соотношение радиальной и осевой компонент магнитного поля характеризует акустическую помехозащищенность ЭМА-преобразователя при любых положениях и размерах высокочастотного индуктора и позволяет определить максимальные размеры индуктора для достижения оптимальной помехозащищенности и чувствительности преобразователя (пропорциональной его апертуре). Зависимости акустической помехозащищенности от величины смещения индуктора относительно системы намагничивания исследованы экспериментально.

Предложена модель формирования серии многократных отражений при неравномерности возбуждения волн по периметру прутка, вызванного осевым смещением объекта относительно проходного ЭМА-преобразователя, теоретически и экспериментально исследовано влияние перекоса на информативные параметры получаемой осциллограммы. Даны рекомендации по конструированию проходного ЭМА-преобразователя с позиций выбора размера апертуры высокочастотного индуктора и его позиционирования относительно системы подмагничивания, а также по оптимизации возможных типоразмеров проходных ЭМА-преобразователей в широком диапазоне контролируемых диаметров объектов. Приведенные результаты теоретических и экспериментальных исследований позволяют исключить влияние мешающих факторов и повысить достоверность результатов контроля цилиндрических объектов многократным зеркально-теневым методом.

Ключевые слова: электромагнитно-акустический преобразователь, акустическая помехозащищенность, зеркально-теневой метод контроля, цилиндрический объект, неравномерность зазора, моделирование.

Введение

Бесконтактная природа электромагнитно-акустического (ЭМА) принципа возбуждения и приема ультразвуковых волн обеспечивает ряд преимуществ использования ЭМА-преобразователей перед пьезоэлектрическими: 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, окалины, краски, загрязнений; возможность возбуждения и приема любых типов упругих волн, в том числе поперечных с горизонтальной поляризацией. К основным недостаткам ЭМА-преобразователей относится низкий коэффициент преобразования, повысить который возможно за счет применения генераторов высокой мощности и мал шумящих усилителей [1–4], оптимизации систем подмагничивания [5–9], разработки специализированных ЭМА-преобразователей [10, 11]. О широком использовании ЭМА-преобразователей для задач дефектоскопии [12–15],

толщинометрии [16], структуроскопии [17–19], оценки напряженно-деформированного состояния металлоконструкций [20–24], анизотропии свойств проката [25] свидетельствует огромное количество публикаций последних лет в российских журналах, а также в зарубежных изданиях.

В ряде работ показана возможность контроля пруткового проката, насосных штанг, валов и других цилиндрических объектов с применением специализированных проходных ЭМА-преобразователей, реализующих зеркально-теневой метод на многократных отражениях, позволяющий эффективно выявлять поверхностные и внутренние дефекты и отклонения от формы поперечного сечения объекта [26–28], оценивать структурное и напряженно-деформированное состояние материала [29, 30].

Достоверность результатов контроля в существенной мере зависит от конструктивных особенностей проходного ЭМА-преобразователя. Так, наличие двух компонент в поле подмагничивания ЭМА-преобразователя может вести к возникновению наряду с основным типом нежелательного типа волн, что, в свою очередь, искажает информативные параметры контроля и может вести к перебраковке изделия. Требования по минимизации количества типоразмеров проходных ЭМА-преобразователей при широкой номенклатуре пруткового проката могут вести к осевому смещению прутка внутри ЭМА-преобразователя, следовательно, к снижению достоверности контроля.

В статье исследовано влияние конструктивных особенностей ЭМА-преобразователя, вызванных изменением взаимного расположения высокочастотного индуктора и системы намагничивания, а также осевым смещением прутка относительно проходного преобразователя, на результаты формирования серии многократных

отражений зеркально-теневое метода и даны рекомендации по конструированию ЭМА-преобразователя для повышения достоверности результатов контроля.

Влияние взаимного расположения магнитной системы и высокочастотного индуктора

Известно, что в зависимости от взаимной ориентации линий поля подмагничивания и направления тока в высокочастотном индукторе накладной ЭМА-преобразователь позволяет возбуждать и принимать в объекте контроля как продольные, так и поперечные волны [31], при этом смещение индуктора в область существования двух компонент магнитного поля может привести к одновременному появлению обоих типов волн.

На рис. 1 представлена схема возбуждения поперечных волн ЭМА-преобразователем проходного типа. Специализированная система подмагничивания (рис. 2) создает в объекте контроля постоянное магнитное поле, силовые линии которого замыкаются определенным образом, при этом в любой точке объекта суммарный вектор индукции магнитного поля B_0 раскладывается на радиальную B_r и осевую B_z составляющие.

В положении I (рис. 2) формируется магнитное поле с преимущественным направлением вектора индукции магнитного поля B_0 по радиусам цилиндрического объекта (радиальная составляющая). Вихревые токи i_v , индуцируемые токами i высокочастотного индуктора, взаимодействуя с постоянным магнитным полем B_0 , приводят к появлению сил Ампера F_A , которые, в свою очередь, вызывают механические колебания частиц в объекте контроля в направлении оси объекта и формируют поперечную T -волну осевой поляризации радиальных направлений по сечению.

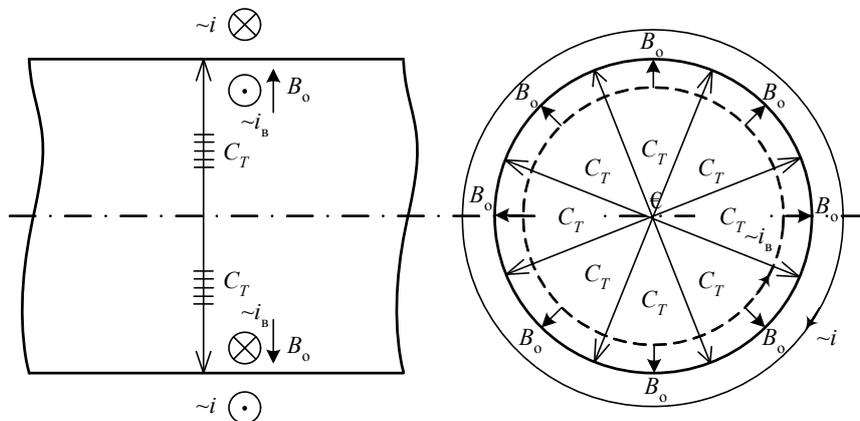


Рис. 1. Принцип действия проходных ЭМА-преобразователей поперечных волн радиальных направлений по сечению

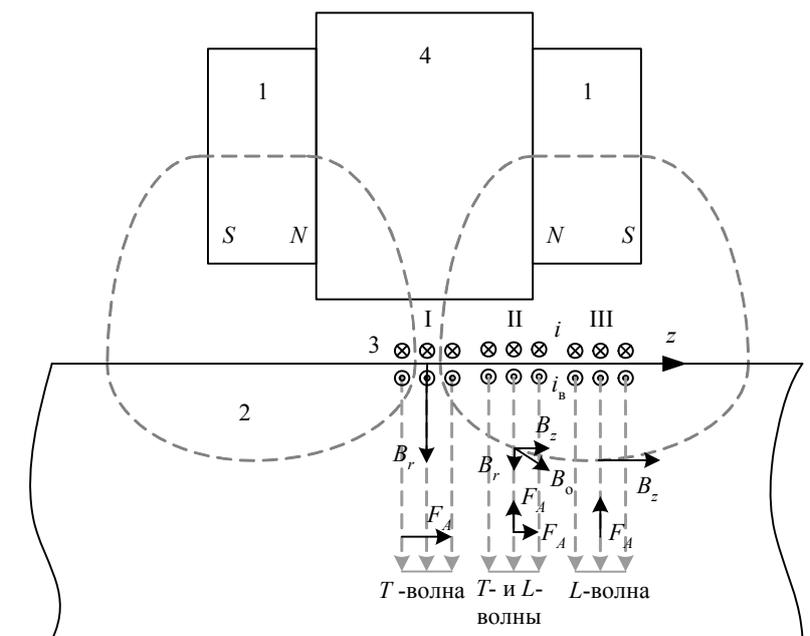


Рис. 2. Схема возбуждения продольных и поперечных ультразвуковых волн ЭМА-преобразователем проходного типа: 1 – постоянные магниты; 2 – объект контроля; 3 – катушка индуктивности; 4 – магнитопровод

В положении III (рис. 2) имеет место максимальная осевая составляющая B_z поля подмагничивания, при этом силы Ампера F_A вызывают механические колебания частиц в радиальных направлениях, и формируется продольная L-волна.

При размещении индуктора в области существования двух компонент магнитного поля – B_r и B_z (положение II на рис. 2) – возможно одновременное излучение (прием) двух типов волн, распространяющихся в направлении радиусов объекта с разными скоростями – основной поперечной T и мешающей продольной L.

Для оценки соотношения амплитуд основного T и нежелательного L типов волн и закономерностей их появления в зависимости от местоположения высокочастотного индуктора проведено конечно-элементное моделирование системы подмагничивания проходного ЭМА-преобразователя в программной среде COMSOL Multiphysics. Основные параметры конфигурации и характеристик магнитной системы представлены в таблице. Зависимость индукций радиальной

и осевой составляющих магнитного поля вдоль координаты на поверхности объекта, полученные в ходе моделирования, представлены на рис. 3.

Из рис. 3 следует, что строго по центру системы подмагничивания при $z=0$ радиальная B_r компонента магнитного поля (отвечает за излучение поперечных T-волн) имеет максимальное значение, равное 1,1 Тл, при этом значение осевой компоненты $B_z = 0$. При отклонении от центра наблюдается плавное уменьшение радиальной компоненты при одновременном увеличении абсолютного значения осевой компоненты. При $z = 7,5$ мм наблюдается абсолютный максимум осевой компоненты поля $B_z = 0,9$ Тл, при этом радиальная компонента меняет знак на противоположный, далее увеличивается до значения 0,4 Тл по модулю и затем вновь уменьшается. Соотношение радиальной и осевой компонент магнитного поля по координате z показано на рис.3, б. Указанный график характеризует акустическую помехозащищенность ЭМА-преобразователя при любых положениях высокочастотного индуктора.

Основные параметры при моделировании магнитной системы

Параметр	Значение		
	Магнит	Шайба	Пруток
Остаточная намагниченность, Тл	1,2	0	0
Относительная магнитная проницаемость	–	В зависимости от поля	
Электропроводность, См/м	2×10^{-2}	$8,41 \times 10^6$	
Наружный диаметр, мм	70	80	24
Внутренний диаметр, мм	40	30	–
Толщина, мм	5	10	–

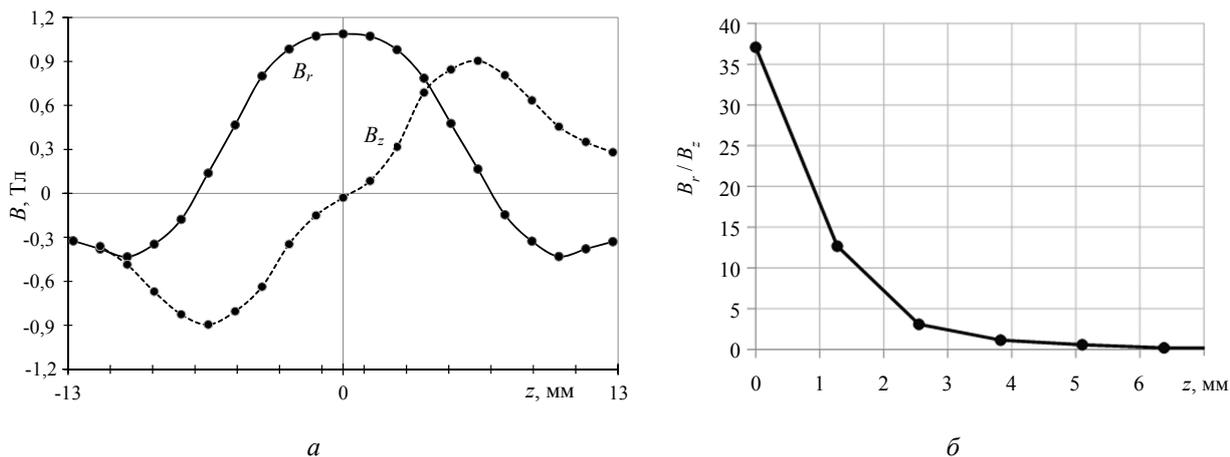


Рис. 3. График изменения радиальной B_r и осевой B_z составляющих магнитного поля (а), график зависимости отношения B_r/B_z от координаты по оси z (б)

Зная отношение B_r/B_z , можно определить максимальные размеры индуктора для достижения оптимальной помехозащищенности и чувствительности преобразователя (пропорциональной его апертуре).

Указанные зависимости были исследованы экспериментально с использованием установки, описанной в [32] на стальном цилиндрическом объекте диаметром 17 мм. В процессе перемещения индуктора шириной 8 мм относительно центра магнитопровода ($z = 0$) регистрировались осциллограммы серии многократных отражений по диаметру объекта. Типичные эхо-

граммы при положении индуктора в центре системы подмагничивания и в положении $z = 8$ мм представлены на рис. 4. Видно, что, находясь в центре системы подмагничивания, ЭМА-преобразователь излучает преимущественно основной тип волны (поперечная T) (рис. 4, а). Смещение индуктора в область ненулевой осевой компоненты приводит к появлению наряду с основной поперечной T -волной мешающей продольной L -волны (рис. 4, б). Так как скорости волн отличаются почти в два раза, возможно одновременное наблюдение импульсов продольной и поперечной волн на временной оси.

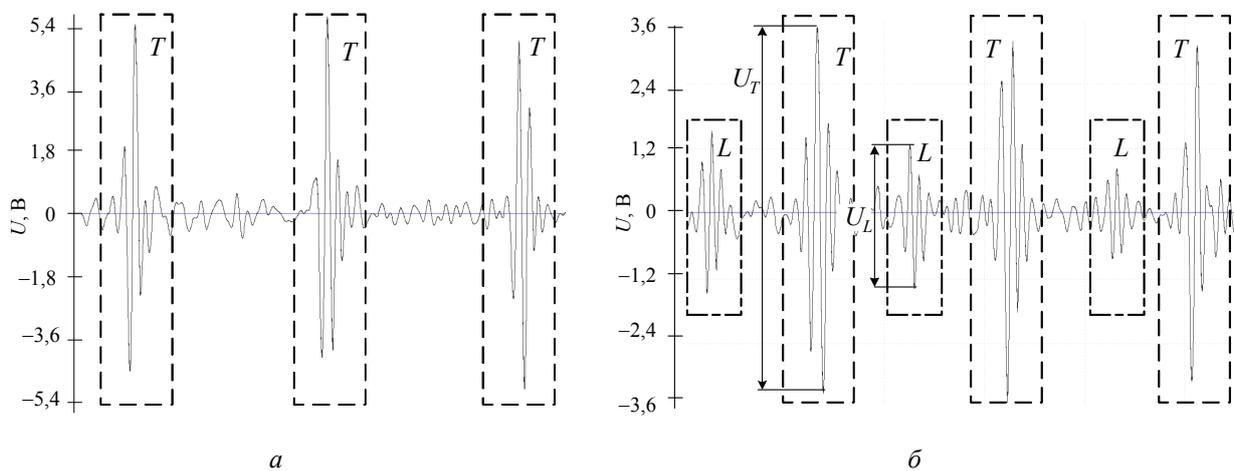


Рис. 4. Эхограмма многократных отражений при $z = 0$ мм (а) и $z = 8$ мм (б)

Результирующий график зависимости отношения амплитуды поперечной U_T к амплитуде продольной U_L волн от величины смещения индуктора z на втором отражении представлен на рис. 5. Согласно рис. 5 даже незначительное смещение индуктора (на 2 мм) уже приводит к возникновению мешающей волны, по амплитуде в 8 раз меньше основной. Изменение поло-

жения индуктора относительно центра на 5 мм ухудшает его помехозащищенность до 4 раз.

Характер зависимости отношения U_T/U_L подобен зависимости отношения B_r/B_z (см. рис. 2, б) от величины смещения z индуктора. Более пологая зависимость отношения амплитуд акустических волн объясняется тем, что смещения в продольной и поперечной акустических волн

нах наряду со значением поля подмагничивания определяются упругими модулями среды, отвечающими за распространение продольных и поперечных волн. При прочих равных условиях соотношение амплитуд поперечных U_T и продольных U_L волн обратно пропорционально квадрату соотношения их скоростей $\gamma = (C_t/C_l)^2$ (то есть $U_T \approx$ в 4 раза больше U_L).

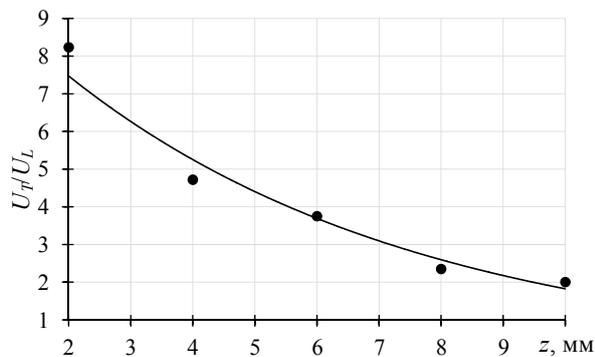


Рис. 5. График зависимости отношения U_T/U_L от величины смещения z

Влияние неравномерности зазора на возбуждение волн проходным электромагнитно-акустическим преобразователем

Общепринятым является утверждение об отсутствии влияния качества контакта на результаты контроля при использовании ЭМА-преобразователя. Последнее утверждение в известной мере справедливо для накладных ЭМА-преобразователей. Однако использование проходных ЭМА-преобразователей с малым коэффициентом заполнения (для цилиндрических деталей меньшего диаметра) может приводить к перекосу относительно центра объекта и к искажению получаемой серии многократных от-

ражений. Одним из осложнений при организации входного контроля прутков-заготовок на предприятиях машиностроения является широкая номенклатура пруткового металлопроката с различными видами отделки поверхности. Так, при производстве пружин систем подрессоривания на ОАО «НПЦ «Пружина» используются прутки 32 типоразмеров по диаметру, 36 типоразмеров по длине и четырех видов отделки поверхности. С целью минимизации количества типоразмеров проходных ЭМА-преобразователей для контроля прутков необходимо оценить влияние на результаты контроля возможной неравномерности в случае перекоса прутка в преобразователе.

Моделирование формирования многократных ультразвуковых эхосигналов в пластине и анализ электроакустического тракта теневого метода при использовании накладных ЭМА-преобразователей представлен в работах [33, 34]. Для анализа процесса формирования серии многократных отражений в случае проходного ЭМА-преобразователя при неравномерности зазора относительно поверхности объекта авторами разработана модель процесса распространения продольной акустической волны, основанная на принципе суперпозиции волн [35]. Считается, что по периметру цилиндрического объекта равномерно распределены элементарные излучатели, представляющие собой элементы поверхности объекта длиной дуги Δl , где формируется взаимодействие элемента вихревого тока Δi_b с осевым полем подмагничивания B_z за счет электродинамического механизма, приводя к появлению сил Ампера F_A (рис. 6) [36]:

$$dF_A = \Delta i_b [\Delta l \cdot B_z].$$

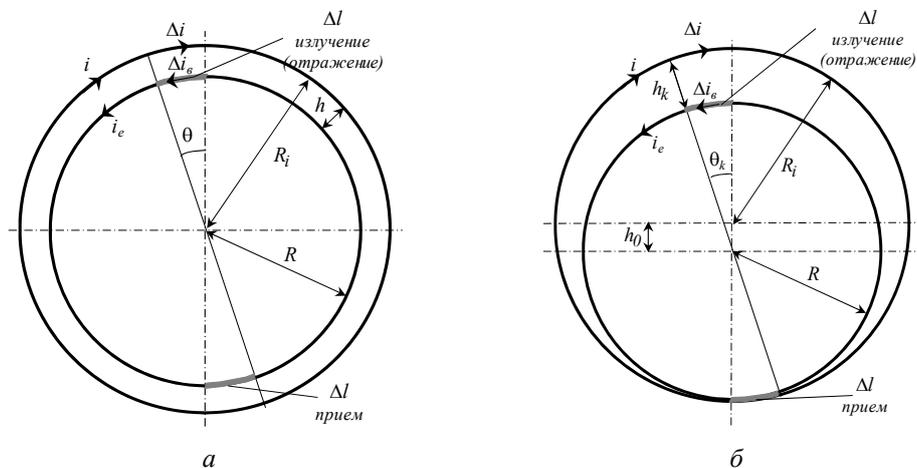


Рис. 6. Модель излучения и приема ультразвуковых волн проходным ЭМА-преобразователем при равномерном зазоре (а), при перекосе индуктора относительно прутка (б)

На диаметрально противоположной поверхности объекта находятся элементарные приемники длиной Δl , где происходит появление электромагнитных полей, порождаемых вихревыми токами в приповерхностном слое объекта, колеблющегося со скоростью V в поле подмагничивания с индукцией B_z , с ЭДС индукции $\Delta \varepsilon$ [37]:

$$\Delta \varepsilon = [V \cdot B_z] \Delta l.$$

Далее происходит процесс многократного переотражения сигналов по диаметрам, при этом противоположный приемнику элемент становится элементарным отражателем. Считаем, что затухание и расхождение акустических волн пренебрежимо мало, и при моделировании им можно пренебречь.

Согласно принципу суперпозиции в случае равномерного зазора между индуктором и объектом контроля (рис. 6, а) моделируемая серия импульсов $U_{\Sigma}(r, t)$ может быть описана формулой

$$U_{\Sigma}(r, t) = \frac{1}{K} \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K F(h) U_k(2nR, t),$$

где $U_k(2nR, t)$ – импульс от k -го элемента, прошедший расстояние $2nR$; R – радиус объекта контроля; K – число элементов суммирования

по окружности (2π радиан), определяемое выражением $K = 2\pi R / \Delta l$, N – анализируемое число переотражений по диаметрам прутка, функция $F(h)$ описывает эффективность возбуждения-приема акустических волн в зависимости от зазора h в совмещенном режиме. Зависимость эффективности возбуждения и приема акустических волн от зазора h между индуктором с током i и поверхностью прутка обусловлена как ослаблением постоянного поля подмагничивания, так и полем вихревых токов.

Результаты моделирования в программной среде COMSOL Multiphysics осевой B_z составляющей магнитного поля и поля вихревых токов для ЭМА-преобразователя продольных волн при различных зазорах h между преобразователем и объектом контроля представлены на рис. 7.

Видно, что при прочих равных условиях влияние зазора на величину вихревых токов существенно выше, чем на величину магнитного поля. Обобщающий график зависимости влияния зазора на относительную эффективность ЭМА-преобразования представлен на рис. 8, согласно которому зависимость амплитуды сигнала в режиме излучения или приема от зазора h может быть аппроксимирована выражением $f(h) \sim \exp(-0,14h)$.

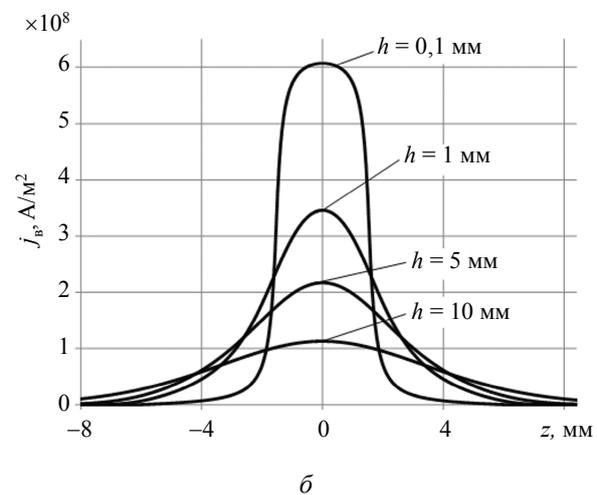
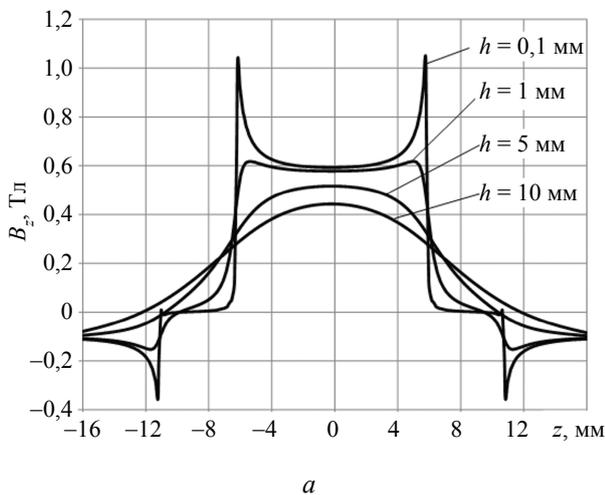


Рис. 7. Распределение осевой B_z составляющей магнитной индукции на поверхности объекта контроля (а); распределение плотности вихревых токов j_v под индуктором при различных зазорах h (б)

При постоянном (равномерном) зазоре h влияние зазора на каждый элементарный излучатель (приемник) одинаково и в режиме двойного преобразования (излучение-прием), функция

$$F(h) = f(h)^2.$$

В случае перекоса проходного ЭМА-преобразователя относительно объекта на величину h_0 (рис. 5, б) наблюдается изменение зазора между индуктором и поверхностью прутка, определяемое углом наблюдения θ_k . Из геометрических соображений зазор h_k между k -м элементом приемника (излучателя) и соответствующим

ему k -м элементом индуктора может быть определен по формуле

$$h_k = R_i - R \frac{\cos(\arcsin(\cos \theta_k \cdot h_0 / R) + \theta_k)}{\cos \theta_k},$$

где R_i – радиус высокочастотного индуктора.

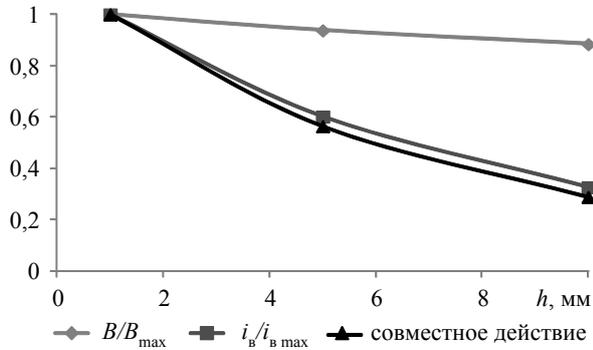


Рис. 8. Зависимости относительного ослабления магнитного поля, поля вихревых токов и их совместного действия от зазора h

Следует отметить, что если для элементарных излучателей (отражателей) функция зависимости от зазора соответствует $f(h_k)$, то для соответствующих диаметрально противоположных приемников эта функция соответствует $f(h_{k+K/2})$ (K – число элементарных излучателей (отражателей, приемников) по длине окружности). В случае двойного раздельного преобразо-

вания излучения и приема при нечетных n ($n = 2m$) обобщенная функция зазора $F(h_k)$ есть произведение указанных функций:

$$F(h_k)|_{n=2m} = f(h_k) \cdot f(h_{k+K/2}).$$

Такой же данная функция остается при любых нечетных переотражениях n . В случае четных n ($n = 2m + 1$) излучатель и приемник является одним и тем же элементом, и обобщенная функция зазора в случае двойного совмещенного преобразования

$$F(h_k)|_{n=2m+1} = f(h_k)^2.$$

При этом формула для моделируемой серии импульсов $U_\Sigma(r)$ преобразуется к виду

$$U_\Sigma(r, t) = \frac{1}{K} \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K F(h_k)|_{n=2m} \cdot U_k(2m \cdot 2R, t) + \frac{1}{K} \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K F(h_k)|_{n=2m+1} \cdot U_k((2m+1) \cdot 2R, t),$$

где $M = N/2$ – анализируемое число четных (нечетных) переотражений по диаметрам прутка.

Результаты моделирования, реализованного в среде MathCad, при отсутствии перекоса и для случая максимального перекоса $h_0 = 2$ мм при радиусе объекта $R = 10$ мм, радиусе индуктора $R_i = 12$ мм представлены на рис. 9.

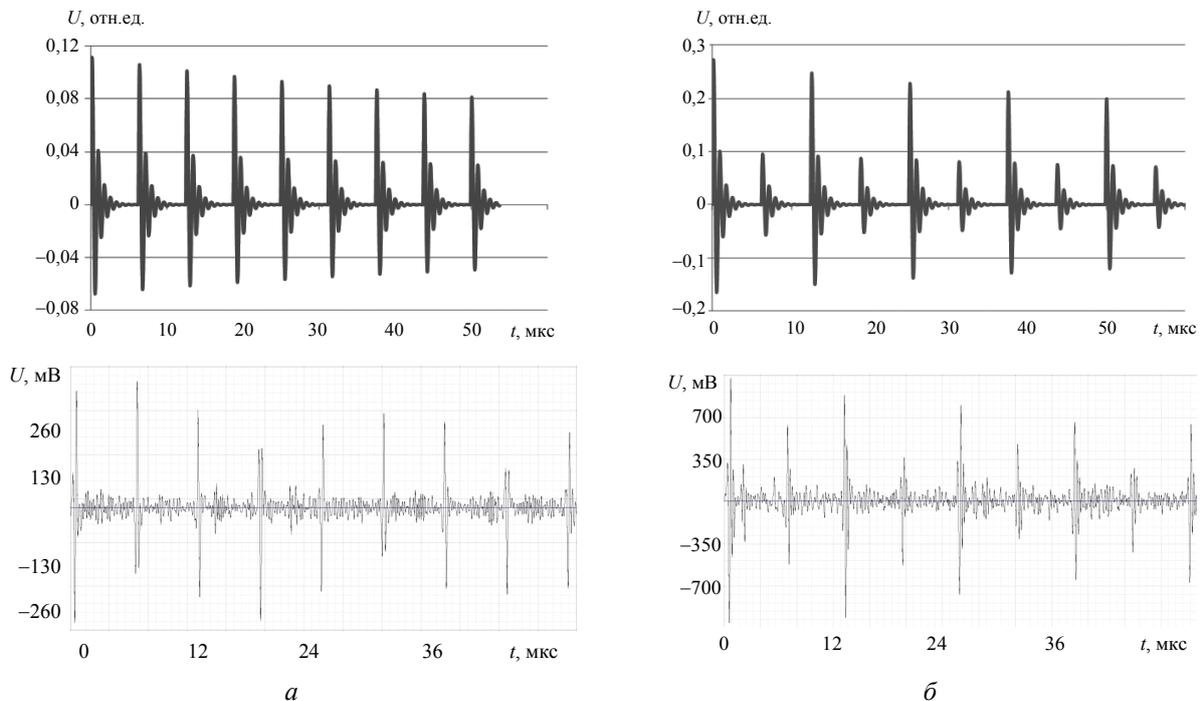


Рис. 9. Моделируемая и экспериментально зарегистрированная серии импульсов при равномерном зазоре $h = 2$ мм (а) при перекосе на $h_0 = 2$ мм (б)

При равномерном зазоре наблюдается плавное уменьшение серии многократных отражений. В случае перекоса наблюдается чередование четных импульсов с малой амплитудой и нечетных с высокой амплитудой. Различия в амплитудах тем больше, чем больше неравномерность зазора. Существенно, что амплитуда нечетных импульсов (а следовательно, эффективность ЭМА-преобразования) больше в случае перекоса, чем при равномерном зазоре того же значения.

Рисунок 10 иллюстрирует зависимость отношения амплитуды нечетного (первого) и чет-

ного (второго) импульсов U_1/U_2 от величины перекоса h_0 (рис. 10, а), а также зависимость амплитуд, пронормированных к максимальному значению при $h_0 = 2$ мм в зависимости от величины перекоса (рис. 10, б).

Результаты моделирования подтверждены экспериментально на прутке из стали 60С2А диаметром $R=10$ мм при радиусе индуктора $R_i=12$ мм и представлены в виде осциллограмм на рис. 8 и 9. Наблюдается удовлетворительное согласование результатов экспериментальных исследований с данными моделирования.

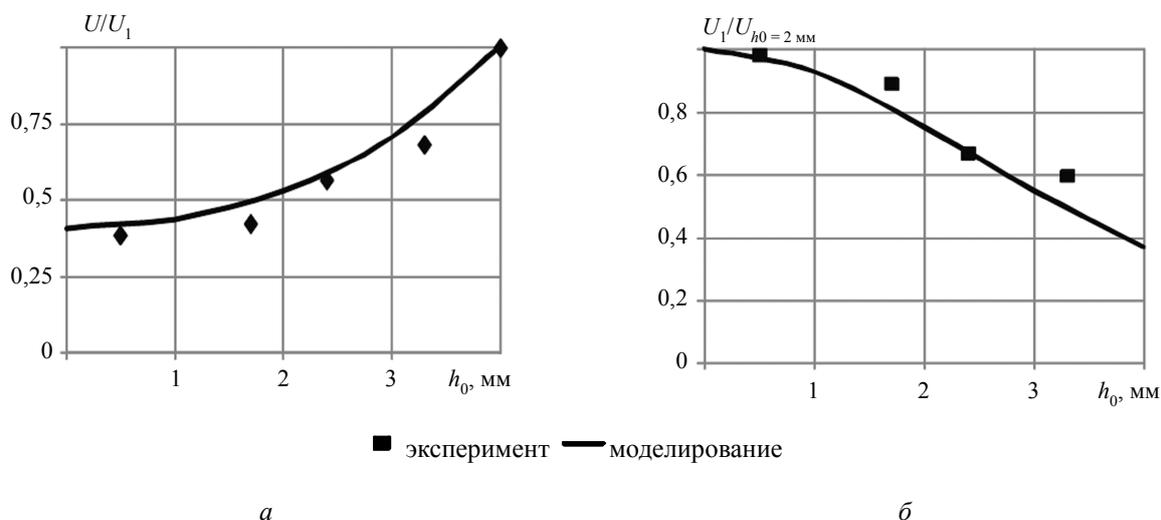


Рис. 10. Зависимость отношения амплитуд четного и нечетного импульсов U_1/U_2 (а) и зависимость амплитуды U_1 , пронормированной к $U_{h_0=2 \text{ мм}}$ (б) в зависимости от величины перекоса h_0

Выводы

Приведенные в статье результаты теоретических и экспериментальных исследований показывают необходимость строгого позиционирования индуктора относительно системы подмагничивания и выбора его размера для достижения максимальной акустической помехозащищенности проходного ЭМА-преобразователя при контроле цилиндрических объектов.

Разработанная модель формирования серии многократных отражений при неравномерности зазора между проходным ЭМА-преобразователем и поверхностью прутка позволяет оценить степень влияния на результат контроля возможных взаимных перекосов, особенно при автоматизированном контроле; оптимизировать количество возможных типоразмеров преобразователей для широкого диапазона контролируемых диаметров прутков; исключить влияние мешающих факторов на результаты контроля.

Библиографические ссылки

1. Информационно-измерительная система возбуждения, приема, регистрации и обработки сигналов электромагнито-акустических преобразователей / В. А. Стрижак, А. В. Пряхин, С. А. Обухов, А. Б. Ефремов // Интеллектуальные системы в производстве. 2011. № 1. С. 243–250.
2. Сучков Г. М., Мигущенко Р. П., Плещенцов С. Ю. Мощные источники питания высокочастотных преобразователей электромагнитного типа для измерений, контроля и диагностики // Дефектоскопия. 2017. Т. 53. № 12. С. 35–39.
3. Злобин Д. В., Муравьева О. В. Особенности построения аппаратуры электромагнито-акустической дефектоскопии пруткового проката с использованием стержневых волн // Вестник ИжГТУ. 2012. № 4(56). С. 99–104.
4. Муравьев В. В., Злобин Д. В., Платунов А. В. Прибор для исследований акустоупругих характеристик тонких проволок // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 6. С. 572–577.
5. Электромагнито-акустический преобразователь с импульсным подмагничиванием / А. В. Михайлов,

- Ю. Л. Гобов, Я. Г. Смородинский, С. В. Щербинин // Дефектоскопия. 2015. № 8. С. 14–23 [Mikhailov A. V., Gobov Y. L., Smorodinskii Y. G., Shcherbinin S. V. (2015). An electromagnetic-acoustic transducer with pulsed biasing. *Defektoskopiya* [Russian Journal of Non-destructive Testing], vol. 51, no. 8, pp. 467-475. DOI: 10.1134/S1061830915080069].
6. Злобин Д. В., Волкова Л. В. Влияние динамического подмагничивания на эффективность электромагнитно-акустического преобразования при волноводном контроле прутков // Приборы и методы измерений. 2017. Т. 8, № 3. С. 236–245 [Zlobin D. V., Volkova L. V. (2017). Influence of Dynamic Magnetization to Improve the Efficiency of Electromagnetic-Acoustic Transformation with Waveguide Control Rods. *Pribory i metody izmerenii* [Devices and Methods of Measurements], vol. 8, no. 3, pp. 236-245. DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-236-245].
7. Isla J., Cegla F. Optimization of the bias magnetic field of shear wave EMATs. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 2016, vol. 63, no. 8, pp. 1148-1160.
8. Моделирование магнитных систем ЭМАП для возбуждения ультразвуковых волн в упругом слое в постоянном и импульсном магнитных полях / А. А. Самокрутов, С. Г. Алехин, В. Г. Шевалдыкин, В. Т. Бобров, С. В. Бобров // Контроль. Диагностика. 2014. № 12. С. 22–27.
9. Муравьев В. В., Стрижак В. А., Балобанов Е. Н. К расчету параметров системы намагничивания электромагнитно-акустического преобразователя // Интеллектуальные системы в производстве. 2011. № 1. С. 197–205.
10. Hirao M., Ogi H. Electromagnetic Acoustic Transducers: Noncontacting Ultrasonic Measurements Using EMATs. Springer, 2016.
11. Lee J. K., Kim Y. Y. Tuned double-coil EMATs for omnidirectional symmetric mode Lamb wave generation. *NDT & E International*, 2016, vol. 83, pp. 38-47.
12. Медведев Д. Д., Смирнов А. Ю. Применение электромагнитно-акустических преобразователей для ультразвукового контроля полуфабрикатов из алюминиевых сплавов // В мире неразрушающего контроля. 2017. Т. 20, № 4. С. 11–13.
13. Xie S., Tian M., Xiao P., Pei C., Chen Z., Takagi T. A hybrid nondestructive testing method of pulsed eddy current testing and electromagnetic acoustic transducer techniques for simultaneous surface and volumetric defects inspection. *NDT & E International*, 2017, vol. 86, pp. 153-163.
14. Электромагнитно-акустический метод оценки технического состояния энергетического оборудования / М. Г. Баширов, И. Г. Хуснутдинова, Л. Г. Хуснутдинова, Д. Р. Усманов // Промышленная энергетика. 2016. № 12. С. 8–13.
15. Isla J., Cegla F. EMAT phased array: a feasibility study of surface crack detection. *Ultrasonics*, 2017, vol. 78, pp. 1-9.
16. Семеренко А. В. Контроль остаточной толщины объектов, подверженных воздействию высоких температур, с помощью электромагнитно-акустического преобразователя // Химическая техника. 2015. № 2. С. 38.
17. Ленков С. В., Федорова Н. В. Резонансный электромагнитно-акустический метод измерения вязкоупругих свойств аморфных ферромагнитных лент, подвергнутых низкотемпературному отжигу // Физика металлов и металловедение. 2014. Т. 115, № 8. С. 800 [Len'kov S. V., Fedorova N. V. (2014). Resonance electromagnetoacoustic method of measuring viscoelastic properties of amorphous ferromagnetic ribbons subjected to low-temperature annealing. *Fizika metallov i metallovedenie* [The Physics of Metals and Metallography], vol. 115, no. 8, pp. 749-755. DOI: 10.1134/S0031918X14080109].
18. Бабкин С. Э. Измерение скорости звука с помощью меандрового электромагнитно-акустического преобразователя // Инженерная физика. 2017. № 1. С. 50–54.
19. Муравьев В. В., Балобанов Е. Н., Печина Е. А. Определение коэффициентов упругоакустической связи ферромагнитных металлов // Вестник ИжГТУ. 2013. № 2(58). С. 108–112.
20. Оценка остаточных напряжений в рельсах с использованием электромагнитно-акустического способа ввода-приема волн / В. В. Муравьев, Л. В. Волкова, В. Е. Громов, А. М. Глезер // Деформация и разрушение материалов. 2015. № 12. С. 34–37 [Murav'ev V. V., Volkova L. V., Gromov V. E., Glezer A. M. (2016). Estimation of the residual stresses in rails using electromagnetic-acoustic introduction-reception of waves. *Deformatsiya i razrushenie materialov* [Russian metallurgy (Metally)], no. 10, pp. 992-995. DOI: 10.1134/S003602951610013X].
21. Муравьев В. В., Стрижак В. А., Пряхин А. В. Исследование внутренних напряжений в металлоконструкциях методом акустоупругости // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2016. Т. 82, № 12. С. 52–57.
22. Муравьев В. В., Волкова Л. В., Лапченко М. А. Ультразвуковой контроль остаточных напряжений в бандажах локомотивных колес при производстве // Дефектоскопия. 2015. № 5. С. 3–16 [Muravyev V. V., Volkova L. V., Lapchenko M. A. (2015). Ultrasonic in-process control of residual stresses in locomotive tires. *Defektoskopiya* [Russian Journal of Nondestructive Testing], vol. 51, no. 5, pp. 259-271. DOI: 10.1134/S1061830915050046].
23. Электромагнитно-акустический метод исследования напряженно-деформированного состояния рельсов / В. В. Муравьев, Л. В. Волкова, А. В. Платунов, В. А. Куликов // Дефектоскопия. 2016. № 7. С. 12–20 [Murav'ev V. V., Volkova L. V., Platonov A. V., Kulikov V. A. (2016). An electromagnetic-acoustic method for studying stress-strain states of rails. *Defektoskopiya* [Russian Journal of Nondestructive Testing], vol. 52, no. 7, pp. 370-376. DOI: 10.1134/S1061830916070044].
24. Муравьев В. В., Тапков К. А. Оценка напряженно-деформированного состояния рельсов при изготовлении // Приборы и методы измерений. 2017. Т. 8, № 3. С. 263–270 [Murav'ev V. V., Tapkov K. A. (2017). Evaluation of Strain-Stress State of the Rails in

the Production. *Pribory i metody izmerenii* [Devices and Methods of Measurements], vol. 8, no. 3, pp. 236-245. DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-263-270].

25. *Муравьев В. В., Муравьева О. В., Волкова Л. В.* Влияние анизотропии механических свойств тонколистового стального проката на информативные параметры волн Лэмба // *Сталь*. 2016. № 10. С. 75–79 [Murav'ev V. V., Murav'eva O. V., Volkova L. V. (2016). Influence of the mechanical anisotropy of thin steel sheets on the parameters of Lamb waves. *Stal'* [Steel in Translation], vol. 46, no. 10, pp. 752-756. DOI: 10.3103/S0967091216100077].

26. *Муравьева О. В., Соков М. Ю.* Влияние глубины залегания дефекта на параметры многократно-теневое электромагнитно-акустического метода контроля прутков // *Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова*. 2016. № 3(71). С. 46–50.

27. *Муравьева О. В., Зорин В. А.* Метод многократной тени при контроле цилиндрических объектов с использованием рэлеевских волн // *Дефектоскопия*. 2017. № 5. С. 3–9 [Murav'eva O. V., Zorin V. A. (2017). The multiple shadow method applied to testing cylindrical objects with Rayleigh waves. *Defektoskopiya* [Russian Journal of Nondestructive Testing], vol. 53, no. 5, pp. 337-342. DOI: 10.1134/S1061830917050059].

28. Анализ сравнительной достоверности акустических методов контроля пруткового проката из рессорно-пружинных сталей / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, В. А. Стрижак, А. В. Пряхин, Е. Н. Фокеева // *Дефектоскопия*. 2014. № 8. С. 3–12 [Murav'ev V. V., Murav'eva O. V., Strizhak V. A., Pryakhin A. V., Fokeeva E. N. (2014). An analysis of the comparative reliability of acoustic testing methods of bar stock from spring steels. *Defektoskopiya* [Russian Journal of Nondestructive Testing], vol. 50, no. 8, pp. 435-442. DOI: 10.1134/S1061830914080063].

29. *Муравьев В. В., Муравьева О. В., Кокорина Е. Н.* Акустическая структуроскопия и дефектоскопия прутков из стали 60С2А при производстве пружин с наноразмерной структурой // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2013. № 4. С. 66–70.

30. *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 [Murav'ev V. V., Murav'eva O. V., Petrov K. V. (2017). Connection between the properties of 40kh-steel bar stock and the speed of bulk and rayleigh waves. *Defektoskopiya* [Russian Journal of Nondestructive Testing], vol. 53, no. 8, pp. 560-567. DOI: 10.1134/S1061830917080046].

31. *Буденков Г. А., Недзвецкая О. В.* Динамические задачи теории упругости в приложении к проблемам акустического контроля и диагностики. М.: Физико-математическая литература, 2004. 136 с.

32. Аппаратно-программный комплекс контроля прутков зеркально-теневым методом на многократных отражениях / В. А. Стрижак, А. В. Пряхин, Р. Р. Хасанов, А. Б. Ефремов // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2017. Т. 60, № 6. С. 565–571.

33. *Бобров В. Т., Шевалдыкин В. Г.* Многократные ультразвуковые эхо-сигналы в пластине. Анализ и применение // *В мире неразрушающего контроля*. 2016. Т. 19, № 1. С. 36–39.

34. *Аббакумов К. Е., Степаненко Н. В.* Моделирование электроакустического тракта теневого метода ультразвукового контроля при использовании бесконтактных датчиков // *Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ*. 2013. № 8. С. 67–72.

35. *Муравьева О. В., Мышкин А. В.* Моделирование акустических полей синфазных электромагнитно-акустических преобразователей // *Дефектоскопия*. 2013. № 12. С. 69–76 [Murav'eva O. V., Myshkin A. V. (2013). Simulation of acoustic fields of synphase electromagnetic-acoustic transducers. *Defektoskopiya* [Russian Journal of Nondestructive Testing], vol. 49, no. 12, pp. 728-734. DOI: 10.1134/S1061830913120061].

36. *Буденков Г. А., Коробейникова О. В.* Влияние химического состава и температуры металлов на эффективность электромагнитно-акустического преобразования // *Дефектоскопия*. 2009. № 4. С. 41–49 [Budenkov G. A., Korobeinikova O. V. (2009). Influence of the chemical composition and temperature of metals on the efficiency of electromagnetic-acoustic transformation. *Defektoskopiya* [Russian Journal of Nondestructive Testing], vol. 45, no. 4, pp. 252-258].

37. Там же.

References

1. Strizhak V. A., Pryakhin A. V., Obukhov S. A., Efremov A. B. (2011). Information-measuring system of excitation, reception, registration and processing of signals of electromagnetic-acoustic transducers. *Intellectual'nye sistemy v proizvodstve* [Intellectual systems in production], no. 1, pp. 243-250 (in Russ.).

2. Suchkov G. M., Migushchenko R. P., Plesnetsov S. Yu. (2017). Powerful power supplies of high-frequency converters of electromagnetic type for measurement, control and diagnostics. *Defektoskopiya* [Russian Journal of Nondestructive Testing], no. 12, pp. 35-39 (in Russ.).

3. Zlobin D. V., Murav'eva O. V. (2012). Features of the construction of equipment for electromagnetic-acoustic flaw detection of rod stock using rod waves. *Vestnik IzhGTU* [Bulletin IzhSTU], no. 4, pp. 99-104 (in Russ.).

4. Murav'ev V. V., Zlobin D. V., Platunov A. V. (2017). A device for studying the acoustoelastic characteristics of thin wires. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering], vol. 60, no 6, pp. 572-577 (in Russ.).

5. Mikhailov A. V., Gobov Yu. L., Smorodinskii Ya. G., Shcherbinin S. V. (2015). An electromagnetic-acoustic transducer with pulsed biasing. *Defektoskopiya* [Russian Journal of Nondestructive Testing], no. 8, pp. 14-23 (in Russ.) DOI: 10.1134/S1061830915080069.

6. Zlobin D. V., Volkova L. V. (2017). Influence of Dynamic Magnetization to Improve the Efficiency of Electromagnetic-Acoustic Transformation with Waveguide Control Rods. *Pribory i metody izmerenii* [Devices and

- Methods of Measurements], vol. 8, no. 3 pp. 236-245 (in Russ.) DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-236-245.
7. Isla J., Cegla F. (2016). Optimization of the bias magnetic field of shear wave EMATs. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 63, no. 8, pp. 1148-1160.
8. Samokrutov A. A., Alekhin S. G., Shevaldykin V. G., Bobrov V. T., Bobrov S. V. (2014). Modeling of EMAT magnetic systems for excitation of ultrasonic waves in an elastic layer in a constant and pulsed magnetic fields. *Kontrol'. Diagnostika* [Testing. Diagnostics], no. 12, pp. 22-27 (in Russ.).
9. Murav'ev V. V., Strizhak V. A., Balobanov E. N. (2011). To the calculation of the parameters of the magnetization system of the electromagnetic-acoustic transducer. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve* [Intelligent systems in manufacturing], no. 1, pp. 197-205 (in Russ.).
10. Hirao M., Ogi H. (2016). Electromagnetic Acoustic Transducers: Noncontacting Ultrasonic Measurements Using EMATs. Springer.
11. Lee J. K., Kim Y. Y. (2016). Tuned double-coil EMATs for omnidirectional symmetric mode Lamb wave generation. *NDT & E International*, vol. 83, pp. 38-47.
12. Medvedev D. D., Smirnov A. Yu. (2016). Application of electromagnetic-acoustic transducers for ultrasonic inspection of semi-finished products from aluminum alloys. *V mire nerazruchayushchego kontrolya* [NDT world], vol. 20, no. 4, pp. 11-13 (in Russ.).
13. Xie S., Tian M., Xiao P., Pei C., Chen Z., Takagi T. (2017). A hybrid nondestructive testing method of pulsed eddy current testing and electromagnetic acoustic transducer techniques for simultaneous surface and volumetric defects inspection. *NDT & E International*, vol. 86, pp. 153-163.
14. Bashirov M. G., Khusnutdinova I. G., Khusnutdinova L. G., Usmanov D. R. (2016). Electromagnetic-acoustic method for assessing the technical condition of power equipment. *Promyshlennaya energetika* [Industrial power engineering], no. 12, pp. 8-13 (in Russ.).
15. Isla J., Cegla F. (2017). EMAT phased array: a feasibility study of surface crack detection, *Ultrasonics*, vol. 78, pp. 1-9.
16. Semerenko A. V. (2015). Control of the residual thickness of objects exposed to high temperatures using an electromagnetic-acoustic transducer. *Khimicheskaya tekhnika* [Chemical engineering], no. 2, p. 38 (in Russ.).
17. Len'kov S. V., Fedorova N. V. (2014). Resonance electromagnetoacoustic method of measuring viscoelastic properties of amorphous ferromagnetic ribbons subjected to low-temperature annealing. *Fizika metallov i metallovedenie* [Physics of Metals and Metallography], vol. 115, no. 8, p. 800 (in Russ.). DOI: 10.1134/S003602951610013X
18. Babkin S. E. (2017). Measuring the speed of sound using a meandering electromagnetic-acoustic transducer. *Inzhenernaya fizika* [Engineering physics], no. 1, pp. 50-54 (in Russ.).
19. Murav'ev V. V., Balobanov E. N., Pechina E. A. (2013). Determination of the coefficients of elastic-acoustic coupling of ferromagnetic metals. *Vestnik IzhGTU* [Bulletin *IzhGTU*], no. 2 (58), pp. 108-112 (in Russ.).
20. Murav'ev V. V., Volkova L. V., Gromov V. E., Glezer A. M. (2015). Estimation of the residual stresses in rails using electromagnetic-acoustic introduction-reception of waves. *Deformatsiya i razrushenie materialov* [Russian metallurgy (Metally)], no. 12, pp. 34-37 (in Russ.) DOI: 10.1134/S003602951610013X.
21. Murav'ev V. V., Strizhak V. A., Pryakhin A. V. (2016). Investigation of internal stresses in metal structures using the acoustoelasticity method. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov* [Plant laboratory. Diagnostics of materials], vol. 82, no. 12, pp. 52-57 (in Russ.).
22. Murav'ev V. V., Volkova L. V., Lapchenko M. A. (2015). Ultrasonic in-process control of residual stresses in locomotive tires. *Defektoskopiya* [Russian Journal of Nondestructive Testing], no. 5, pp. 03-16 (in Russ.). DOI: 10.1134/S1061830915050046.
23. Murav'ev V. V., Volkova L. V., Platunov A. V., Kulikov V. A. (2016). An electromagnetic-acoustic method for studying stress-strain states of rails. *Defektoskopiya* [Russian Journal of Nondestructive Testing], no. 7, pp. 12-20 (in Russ.). DOI: 10.1134/S1061830916070044.
24. Murav'ev V. V., Tapkov K. A. (2017). Evaluation of the stress-strain state of rails during manufacturing. *Pribory i metody izmerenii* [Devices and Methods of Measurements], vol. 8, no. 3, pp. 263-270 (in Russ.). DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-263-270
25. Murav'ev V. V., Murav'eva O. V., Volkova L. V. (2016). Influence of the mechanical anisotropy of thin steel sheets on the parameters of Lamb waves. *Stal'* [Steel in Translation], no. 10, pp. 75-79 (in Russ.). DOI: 10.3103/S0967091216100077.
26. Murav'eva O. V., Sokov M. Yu. (2016). Influence of the depth of occurrence of a defect on the parameters of a multiple-shadow electromagnetic-acoustic method for controlling rods. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova* [Bulletin of Kalashnikov ISTU], no. 3(71), pp. 46-50 (in Russ.).
27. Murav'eva O. V., Zorin V. A. (2017). The multiple shadow method applied to testing cylindrical objects with Rayleigh waves. *Defektoskopiya* [Russian Journal of Nondestructive Testing], no. 5, pp. 3-9 (in Russ.). DOI: 10.1134/S1061830917050059.
28. Murav'ev V. V., Murav'eva O. V., Strizhak V. A., Pryakhin A. V., Fokeeva E. N. (2014). An analysis of the comparative reliability of acoustic testing methods of bar stock from spring steels. *Defektoskopiya* [Russian Journal of Nondestructive Testing], no. 8, pp. 3-12 (in Russ.). DOI: 10.1134/S1061830914080063.
29. Murav'ev V. V., Murav'eva O. V., Kokorina E. N. (2013). *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Chernaya metallurgiya* [Izvestiya - Ferrous Metallurgy.], no. 4, pp. 66-70 (in Russ.).
30. Murav'ev V. V., Murav'eva O. V., Petrov K. V. (2017). Connection between the properties of 40kh-steel bar stock and the speed of bulk and rayleigh waves. *Defektoskopiya* [Russian Journal of Nondestructive Testing], no. 8, pp. 20-28 (in Russ.). DOI: 10.1134/S1061830917080046

31. Budenkov G. A., Nedzvetskaya O. V. (2004). *Dynamic problems of the theory of elasticity in application to problems of acoustic control and diagnostics*. [Dynamic problems of elasticity theory in to the problems of acoustic control and diagnostics]. Moscow: Izdatel'stvo Fiziko-matematicheskoi literatury (in Russ.).
32. Strizhak V. A., Pryakhin A. V., Khasanov R. R., Efremov A. B. (2017). The hardware-software complex for controlling bars in a mirror-shadow method on multiple reflections. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering], vol. 60, no. 6, pp. 565-571 (in Russ.).
33. Bobrov V. T., Shevaldykin V. G. (2016). Multiple ultrasound echoes in the plate. Analysis and application. *V mire nerazrushayushchego kontrolya* [NDT world], vol. 19, no. 1, pp. 36-39 (in Russ.).
34. Abbakumov K. E., Stepanenko N. V. (2013). Modeling of the electroacoustic path of the shadow method of ultrasonic testing using non-contact sensors. *Izvestiya SPbGETU LETI*, no. 8, pp. 67-72 (in Russ.).
35. Murav'eva O. V., Myshkin A. V. (2013). Simulation of acoustic fields of synphase electromagnetic-acoustic transducers. *Defektoskopiya* [Russian Journal of Nondestructive Testing], no. 12, pp. 69-76 (in Russ.). DOI: 10.1134/S1061830913120061.
36. Budenkov G. A., Korobeinikova O. V. (2009). Influence of the chemical composition and temperature of metals on the efficiency of electromagnetic-acoustic transformation. *Defektoskopiya* [Russian Journal of Nondestructive Testing], no. 4, pp. 41-49 (in Russ.).
37. Ibid.

The Effect of Electromagnetic Acoustic Transducer Design Features on Results of Cylinder Object Testing

K. V. Petrov, Post-graduate, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

M. Yu. Sokov, Post-graduate, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

O. V. Muraveva, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU; Udmurt Federal Research Center of Ural Branch of Russian Academy of Science, Izhevsk, Russia

The effect of electromagnetic acoustic transducer (EMAT) design features, caused by a change of relative position between high-frequency inductor and magnetizing system, on transducer's acoustic interference resistance and results of multiple reflection echo series formation are investigated. Finite-element simulation of the field magnetization system of passing through EMAT is made in COMSOL Multiphysics software to estimate the ratio of main shear and disturbing longitudinal waves amplitudes and their appearance dependency on high-frequency inductor location. The radial and axial magnetic components ratio characterizes the acoustic interference resistance of EMAT under any high-frequency inductor location and size. From the one hand, it also allows to define maximum high-frequency inductor size to reach the optimal interference resistance. From the other hand, it allows to reach transducer sensitivity (proportional to its aperture). The acoustic interference resistance to relative position value between high-frequency inductor and magnetizing system dependencies are experimentally researched.

The model of multiple reflection echo series formation under irregularity wave excitation along the bar perimeter, caused by axial displacement of the object towards passing through EMAT is theoretically and experimentally suggested. The effect of gap irregularity skew on information-bearing parameter of generated oscillogram is researched. The recommendations to passing through EMAT design engineering from the perspective of choosing the aperture size of high-frequency inductor and its point-to-point motion towards magnetizing system are given. The recommendations to optimization of probable typical passing through EMAT size in long range diameters of testing objects are also shown. The given theoretical and experimental investigation results make it possible to exclude disrupters influence and to advance test validity of cylinder objects with the multiple reflection echo –shadow testing method.

Keywords: electromagnetic acoustic transducer, acoustic interference resistance, echo-shadow testing method, cylinder object, gap irregularity, simulation.

Получено 30.03.2018