

## НОВЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ (ОБЗОР)

С. Ю. ПЛЕСНЕЦОВ, Г. М. СУЧКОВ, А. И. КОРЖ, М. Д. СУВОРОВА

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт». 61002, г. Харьков, ул. Кирпичева, 2.  
E-mail: [hpi.suchkov@gmail.com](mailto:hpi.suchkov@gmail.com)

Выполнен анализ информационных источников за последние годы, в которых приведены результаты теоретических и модельных исследований электромагнитно-акустического способа возбуждения и приема ультразвуковых волн объемного, поверхностного и нормального типов. Установлено, что комплексными теоретическими и модельными исследованиями создаются более эффективные основы конструирования ЭМА преобразователей различного назначения. Показана возможность создания ЭМАП с фазированными решетками, а также устройств с импульсными источниками поляризуемого магнитного поля. Библиогр. 25, рис. 4.

*Ключевые слова:* электромагнитно-акустическое преобразование, свойства материалов, неразрушающий контроль, измерения, диагностика, толщинометрия, моделирование

Многие исследователи из разных стран выполняют теоретические, модельные и практические исследования, направленные на разработку электромагнитно-акустических (ЭМА) приборов. Однако уровень сложности и многообразие проблем, решаемых при исследованиях и создании средств контроля и диагностики на базе ЭМА преобразователей (ЭМАП), оказался настолько высоким, а перспективы, открывающиеся при этом столь значительными, что результаты, достигнутые в прошлом в этой области, не могут быть исчерпывающими.

В журнале «Дефектоскопия» в виде обзоров до 2005 г. [1–3] рассмотрены вопросы, связанные с проблемами исследований, разработки и реализации средств электромагнитно-акустических измерений, контроля и диагностики оборудования, изделий и материалов. Достаточно широко достижения, связанные с ЭМА способом, представлены в справочнике [4]. За прошедшие 10–15 лет выполнено много новых работ в этом направлении. Возникла необходимость в их анализе, систематизации и определении путей дальнейшего развития ЭМА метода и средств его реализации. Поскольку количество публикаций оказалось значительным, обзор информационных источников выполнен в несколько этапов: теоретические вопросы; ЭМА преобразователи; специальные элементы ЭМА приборов; возможности средств контроля с ЭМА преобразователями; установки и приборы для толщинометрии, дефектоскопии, измерений и диагностики; особенности метрологического обеспечения.

Целью работы является анализ новых литературных источников и установление тенденций

развития средств измерений, контроля и диагностики с использованием ЭМА способа возбуждения и приема ультразвуковых волн.

**Анализ теоретических и модельных исследований.** Ермолов И. Н. в работе [5] рассмотрел «...достижения в теоретических вопросах ультразвуковой дефектоскопии примерно за 20 прошедших лет». Им показано, что в последнее время наметились тенденции использования новых или мало применяемых типов ультразвуковых волн, которые раньше почти не использовались для диагностики объектов различного вида. В связи с этим возникают проблемы теоретического и практического характера. Значительное количество существенных проблем контроля может быть решено с применением ЭМА преобразователей. При этом Ермолов И. Н. указывает на недостаточность разработок специального оборудования для реализации ЭМА метода в промышленности: ЭМАП, генераторов мощных импульсов, усилителей, быстросрабатывающих систем обработки информации.

Сазонов Ю. И. в работе [6] указывает на то, что исследования макро- и микроскопических механизмов ЭМА преобразования различного вида является одной из наиболее важных и, в то же время, сложных проблем радиофизики, физической и прикладной акустики, физики твердого тела, физики магнитных явлений, теплофизики и молекулярной физики. Исследование ЭМА эффектов является нетипичной задачей электродинамики взаимодействующих тел и полей разного типа и структуры. Изучение ЭМА эффекта дает возможность лучше понять физические процессы генерации, распространения и приема ультразвуковых волн электромагнитными методами, что

© С. Ю. Плеснецов, Г. М. Сучков, А. И. Корж, М. Д. Суворова, 2018

важно для построения общей теории и создания разного рода устройств и преобразователей, т. е. ставится задачи построения общей теории ЭМА преобразования; создания научных основ конструирования ЭМАП и необходимого специального оборудования.

За последние 15 лет группой исследователей в составе Мужижкого В. Ф., Комарова В. А., Ремезова В. Б., которые считаются на постсоветском пространстве ведущими теоретиками, опубликовано более 50 теоретических статей в журналах «Дефектоскопия», «Контроль. Диагностика», «В мире неразрушающего контроля», направленных на исследование механизмов прямого, обратного и двойного ЭМА преобразования в приложении к толщиномерии и дефектоскопии в нормальном и тангенциальном поляризующих полях в основном для накладных ЭМАП. Во всех этих статьях, по сравнению с аналогичными работами, выполненными в прошлом веке Буденковым Г. А., Глуховым Н. А., Сазоновым Ю. И., Шкарлетом Ю. М., Шубаевым С. Н. и др., рассмотрены частные задачи, в которых не найдены новые принципиальные научные решения по созданию общей теории ЭМА преобразования. Отсутствуют также разработки основных положений, которые бы дали возможность конструировать ЭМА преобразователи на базе таких исследований. Одной из типичных работ по оценке коэффициента ЭМА преобразования является статья [7]. Авторы по-прежнему приводят давно известные данные трех типов (видов) взаимодействия ЭМАП и металла.

При возбуждении:

1. Взаимодействие вихревых токов  $i_b$  длиной  $dl$  с индукцией поля подмагничивания  $B_0$  (сила Ампера  $F_A$ ):

$$F_A = i_b [dl B_0].$$

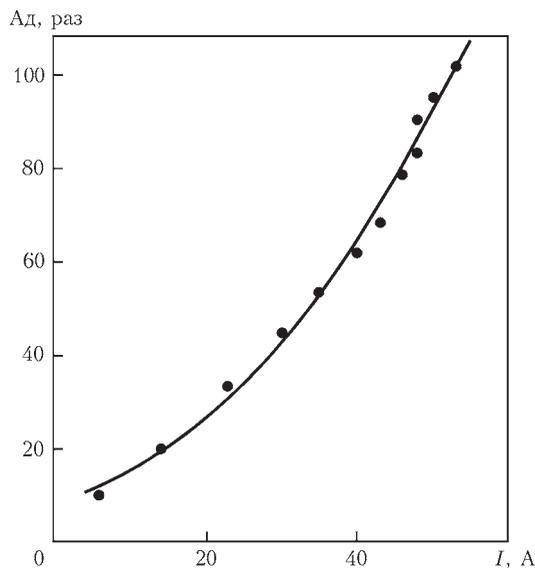


Рис. 1. Влияние значения тока в катушке прямого ЭМАП на амплитуду эхо-импульса от плоскодонного отражателя диаметром 4 мм, зазор – 0,2 мм [8]

2. Взаимодействие вихревых токов  $i_b$  с током  $i_k$  высокочастотного индуктора, порождающего вихревой ток, с силой  $F$ :

$$F = \frac{M_0}{4\pi} = \frac{2i_b i_k}{h} dl,$$

где  $h$  – зазор между индуктором и объектом контроля;  $dl$  – средняя длина вихревого тока.

3. Прямые магнитострикционные эффекты. В частности, сила магнитострикционной природы  $F$  при продольной линейной магнитострикции (эффект Джоуля) определяется:

$$F = \sigma_m S = \alpha B_m S,$$

где  $\sigma_m$  – напряжения в акустической волне;  $S$  – площадь ЭМА преобразователя;  $\alpha$  – магнитострикционная постоянная;  $B_m$  – индукция переменного магнитного поля.

В то же время экспериментальные данные [8], рис. 1, показывают, что при возбуждении объемных сдвиговых ультразвуковых импульсов, при прочих одинаковых условиях, отраженная от плоскодонного отражателя диаметром 4 мм амплитуда сигнала имеет нелинейную зависимость от величины тока в индукторе ЭМАП. Это говорит о необходимости совершенствования теории ЭМА преобразования.

Прием акустических волн обусловлен:

– электромагнитными полями, порождаемыми вихревыми токами в приповерхностном слое объекта, колеблющегося со скоростью  $v$  в поле подмагничивания с индукцией  $B_0$ . При этом напряженность переменного магнитного поля  $E = [vB_m]$ , а э.д.с. индукции  $\epsilon_i = [vB_0]dl$ ;

– электромагнитными полями, возникающими за счет обратных магнитострикционных или магнитоупругих эффектов (Маттеучи, Вилари) при деформации металла акустической волной с напряжениями  $\sigma_m$ . При этом индукция переменного магнитного поля  $B_m = \sigma_m \cdot A$  ( $A$  – постоянная чувствительности), а э.д.с. индукции  $\epsilon_i = -SdB/dt = -SA\omega\sigma_m$ , где  $\omega$  – частота переменного магнитного поля.

Результаты экспериментальных исследований [9, 10] чувствительного двойного ЭМА преобразования показали, что одновременно со сдвиговыми линейно поляризованными волнами возбуждаются и принимаются нормально к поверхности плоскопараллельного изделия другие типы волн (рис. 2, поз. 1, 2 и 3). При использовании эхо-метода контроля такие когерентные сигналы будут осложнять анализ результатов дефектоскопии. Эффект появления дополнительных ультразвуковых сигналов до настоящего времени теоретически не исследован. В то же время обнаруженный эффект может найти широкое применение для одновременного определения скоростей объемных волн, упругих постоянных и для безэтальной

толщинометрии одного и того же объема объекта контроля (ОК) одним ЭМАП.

Следовательно, невзирая на значительные объемы ранее выполненных теоретических исследований, до настоящего времени решены далеко не все необходимые для практических разработок научно-технические задачи, в первую очередь комплексно учитывающие все факторы, определяющие процесс ЭМА преобразования. Следовательно можно сделать вывод, что практически все теоретические исследования выполнены для конкретных типов материалов и их состояния, для упрощенных моделей высокочастотных катушек ЭМАП, например, типа «виток» [11], работа которого была рассмотрена еще в семидесятых годах прошлого столетия Шкарлетом Ю. М. В то же время, как определили Ермолов И. Н. и Сазонов Ю. И. [5, 6] с учетом ранее выполненных теоретических работ, современные задачи ЭМА контроля должны быть направлены на создание средств контроля и в первую очередь ЭМАП и специального оборудования, обеспечивающего его эффективную работу.

В последние годы группа ученых из Ижевска под руководством Муравьевой О. В., Муравьева В. В. и Мурашова С. А. опубликовала более 30 теоретических и модельных статей, направленных на ЭМА контроль стержней, труб и аналогичных изделий. Выполнены ограниченные исследования локальных процессов преобразования, диаграмм направленности синфазных и противофазных ЭМА преобразователей при разных размерах и расположении элементов высокочастотных катушек и намагничивающей системы. Из этих разработок следует отметить эффективность применения моделирования магнитных, электромагнитных и акустических полей ЭМАП с помощью современного программного пакета COMSOL Multiphysics. Аналогичный подход эффективно использован в работе [12] при формировании поляризирующего магнитного поля преобразователя, что позволило создать высокоэффективный ЭМАП для контроля волнами Релея. Совместно с аналитическими решениями задач ЭМА преобразования применение

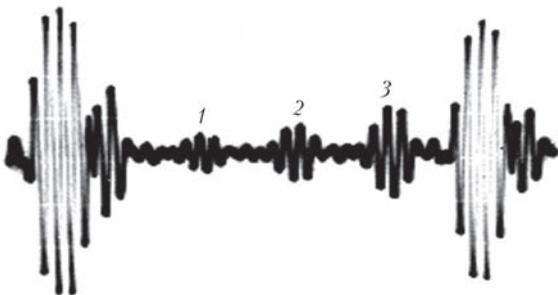


Рис. 2. Реализация на экране осциллографа с изображением двух донных импульсов, между которыми расположены три дополнительных сигнала [9]

современных расчетных пакетов может существенно улучшить возможности разработок ЭМА преобразователей.

Значительная часть исследователей направили усилия на создание средств ЭМА контроля [13] за счет широкого применения моделирования и теоретических исследований. Чабанов В. Е. и Жуков В. А. рассмотрели проблемы, связанные с конструированием ЭМАП [14] и утверждают, что для эффективной разработки ЭМАП необходимо учитывать не менее 35 параметров. Полученная ими математическая модель, учитывающая 38 параметров, определяет напряженность  $\sigma_{R0}(\theta, \varphi, t)$  *SV*-поляризованных волн, излучаемых одним токопроводом, и напряженность  $\sigma_{R\varphi}(\theta, \varphi, t)$  *SH*-поляризованных волн

$$\sigma_{R0}(\theta, \varphi, t) = \frac{iDW_{\varphi}(\theta, \varphi) \operatorname{sinc}(k_i L \sin \theta \cos \frac{\varphi}{2}) \operatorname{sinc}(k_i a \sin \theta \cos \varphi) \psi(\theta, \varphi) \cos \theta f(t)}{RZ(\theta)}$$

$$\sigma_{R\varphi}(\theta, \varphi, t) = \frac{-DW_0(\theta, \varphi) \operatorname{sinc}(k_i L \sin \theta \cos \frac{\varphi}{2}) \operatorname{sinc}(k_i a \sin \theta \cos \varphi) \psi(\theta, \varphi) \cos \theta f(t)}{RZ(\theta)}$$

где  $\theta, \varphi$  – углы наблюдения соответственно в вертикальной и горизонтальной плоскостях сферической системы координат в момент времени  $t$ ;  $i$  – мнимая единица;

$$D = \left(\frac{\pi}{2}\right)^{\frac{1}{2}} \mu_0 B_0 \sigma_2 c_t I_0 L,$$

где  $\mu_0$  – абсолютная магнитная проницаемость;  $B_0$  – индукция вертикальной составляющей постоянного магнитного поля с учетом ее пространственной неоднородности;  $\sigma_2$  – удельная электрическая проводимость материала контроля;  $c_t$  – скорость поперечных волн в материале контроля;  $I_0$  – ток, протекающий по токопроводу;  $L$  – длина работающей части токопровода катушки, расположенного под постоянным магнитом;

$$W_0 =$$

$$[M(\sin^2 \theta \cos^2 \varphi F_2 + F_3) + 2F_1 q \sin^2 \theta] \cos \theta \cos \varphi - \frac{\cos \varphi \sin^2 \theta \{2q q_t (2F_2 \sin^2 \theta \sin^2 \varphi - 2F_3 - q_t F_1)\}}{q_t};$$

$$M = -\cos(2\theta);$$

$$F_1 = M[2q_2(q_2 - q)] + \frac{2 \sin^2 \theta - p^2 m^2}{l(m^2 - p^2)} + \frac{q_2}{q_2 - q_t} + \frac{2(q_2)^2}{m^2 - 1};$$

$$F_2 = \frac{1}{q_2 - q} + \frac{2q_2}{m^2 - p^2} + \frac{q_2 + q_{t1}}{2q_t(q_2 - q_t)} + \frac{2q_2}{m^2 - 1};$$

$$F_3 = \frac{\sin^2 \theta \sin^2 \varphi}{q_2 - q} + \frac{q_2 (2 \sin^2 \theta \sin^2 \varphi)}{m^2 - p^2} +$$

$$+ \frac{q_2(q_t + \sin^2 \theta \sin^2 \varphi) - q \sin^2 \theta \cos^2 \varphi}{2q_t(q_2 - q_t)} + \frac{q_2(2\sin^2 \theta \sin^2 \varphi - m^2)}{m^2 - 1};$$

$$q = -i(p^{-2} - \sin^2 \theta)^{\frac{1}{2}}, \quad q_t = -i \cos \theta,$$

$$q_2 = -i(m^2 - \sin^2 \theta)^{\frac{1}{2}};$$

$$p = \frac{k_t}{k} = \frac{c}{c_{t1}}, \quad m = \frac{k_2}{k_t};$$

$$\Psi(\theta, \varphi) = 2 \left\{ Q_3 [Q_3 \operatorname{sh}(k_t q_3 s) + Q_4 \operatorname{ch}(k_t q_3 s)] \times \right. \\ \times [e^{k_t q_1 (H-h)} - S(\theta, \varphi) e^{k_t q_1 (H-h)}] + \\ \left. + Q [Q_3 \operatorname{ch}(k_t q_3 s) + Q_4 \operatorname{sh}(k_t q_3 s)] [e^{k_t q_1 (H-h)} + S(\theta, \varphi) e^{k_t q_1 (H-h)}] \right\} \times \\ \times \left\{ Q_1 \operatorname{ch}(k_t q_1 H [Q_3 \operatorname{ch}(k_t q_3 s) (Q_2 + Q_4) + \operatorname{sh}(k_t q_3 s) (Q_3^2 + Q_2 Q_4)]) + \right. \\ \left. + \operatorname{sh}(k_t q_1 H) \left[ \frac{Q_3 \operatorname{ch}(k_t q_3 s) (Q_2 Q_4 + Q_1^2) + \operatorname{sh}(k_t q_3 s) (Q_2 Q_3^2 + Q_1^2 Q_4)}{Q_1} \right] \right\}^{-1};$$

$$Q_1 = \frac{q_j}{\mu_j}; \quad q_j = (\sin^2 \theta - \frac{k_j^2}{k_t^2})^{\frac{1}{2}};$$

$s$  – толщина экрана;  $H$  – расстояние между экраном и поверхностью объекта контроля;  $h$  – расстояние между токопроводами катушки и поверхностью металла;

$$S_3 = \operatorname{sinc}(k_t a_3 \sin \theta \sin \frac{\theta}{2}) \times$$

$$\times \operatorname{sinc}(k_t L_0 \sin \theta \cos \frac{\theta}{2}) e^{-ik_t \sin \theta (x_0 \cos \varphi + y_0 \sin \varphi)},$$

$R$  – расстояние от центра токопровода до точки наблюдения;

$$Z(\theta) = \cos^2(2\theta) + 2 \sin \theta \sin(2\theta) (p^{-2} - \sin^2 \theta)^{\frac{1}{2}},$$

$k_j^2 = \omega \mu_j c_0^{-2} (\omega \varepsilon_j - \frac{i\sigma_j}{\varepsilon_0})$  – волновое число электромагнитных волн;  $\omega$  – круговая частота работы преобразователя;  $\varepsilon_0$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость;  $x_0$  и  $y_0$  – смещение центральной части рассматриваемого токопровода относительно центра преобразователя.

Следует отметить, что подробного анализа полученной математической модели авторы не провели, уделив основное внимание эксперименталь-

ным разработкам, что снижает ценность таких исследований. Не представлена методика анализа предложенной сложной математической модели.

Авторы работ [15–20] на базе теории Власова К. Б., теоремы Шокли–Рамо и теоремы Дж. Маллинсона пошли по пути комплексного построения математических моделей, позволяющих создавать и производить расчеты любых конструкций ЭМАП. В работах определены основы возбуждения поверхностных и крутильных колебаний. Авторами была выведена теорема о наведенном магнитном потоке, которая позволяет создавать средства конструирования ЭМА преобразователей

$$\Phi(t) = \frac{\mu_0}{2} \iiint_V [\vec{R}(x_k) \times \vec{j}(x_k, t)] \cdot \vec{\Psi}^{np}(x_k, G) dV,$$

где  $dV = d\vec{l} d\vec{S}$ ;  $\vec{\Psi}^{np}(x_k, G)$  – векторная функция, зависящая от координат точки наблюдения и набора геометрических параметров электрического контура (символ  $G$  в списке аргументов функции), которая описывает пространственное распределение компонентов вектора напряженности магнитного поля  $\vec{H}^{np}(x_k)$ ;  $\vec{j}(x_k, t)$  – результирующая плотность тока проводимости, сформированная ультразвуковыми смещениями.

На основе теоремы о наведенном магнитном потоке разработана математическая модель, которая позволяет выполнять расчет э.д.с., наводимой на индукторе преобразователя любой формы и конструкции. Модель получена для гармонически изменяющегося во времени тока проводимости  $\vec{j}(x_k, t) = \vec{j}(x_k) e^{i\omega t}$ . При этом амплитудное значение разности электрических потенциалов  $U_0(\omega)$  на клеммах электрического контура приемника переменного магнитного поля определено в соответствии с законом Фарадея

$$U_0(\omega) = -i\omega \frac{\mu_0}{2} \iiint_V [\vec{R}(x_k) \times \vec{j}(x_k)] \cdot \vec{\Psi}^{np}(x_k, G) dV.$$

Это выражение имеет смысл математической модели процесса регистрации упругих колебаний в электропроводных неферромагнитных материалах с помощью ЭМП, т. е., конкретизировав  $\vec{\Psi}^{np}(x_k, G)$ , мы всегда рассчитаем оптимальный вариант ЭМАП нужного назначения. Таким образом, в работах [15–20] фактически решена обобщенная задача по ЭМА преобразованию, но для ограниченных разновидностей ультразвуковых волн. При выполнении этих теоретических и модельных исследований учтены нелинейные свойства ферромагнитных материалов и их анизотропия; зависимости электромагнитных свойств от химического состава, величин постоянного и переменного магнитных полей; механизмы возникновения магнитоупругих токов в различных ситуациях при контроле ферромагнитных и неферромагнитных материалов.

В результате аналитически получены волновые и частотные характеристики моделей ЭМА преобразователей с учетом всех действующих факторов при возбуждении волн Релея и крутильных колебаний в трубчатых или стержневых изделиях. Однако разработанный авторами подход целесообразно применить и для других типов ультразвуковых волн.

Дальнейшее развитие теоретических, модельных и экспериментальных исследований нашло в диссертационной работе Мышкина А. В. [21]. Автором разработана физико-математическая модель формирования акустических полей многоэлементных УЗ преобразователей, базирующаяся на теории сосредоточенных источников, обобщенная на случай ЭМАП, учитывающая конструктивные параметры (апертура, количество элементов и зазоры между ними, зазор между ЭМАП и ОК), параметры возбуждения (рабочая частота, амплитудное распределение силового воздействия, фокусировка, угол ввода, режим работы), упругие и электромагнитные свойства ОК, тип излучаемой волны. При расчетах применен упрощенный подход, т. к. использован только вихреоточковый силовой механизм возбуждения ультразвуковых волн

$$F_0 = [\vec{j} \vec{B}_0] = \frac{i\omega\mu_2\mu_0 [\vec{j} \vec{B}_0] e^{-i\omega t} e^{k_2 z}}{2\pi k_2} \times \left( \arctg \frac{x + \frac{e}{2}}{h} \arctg \frac{x - \frac{e}{2}}{h} \right),$$

где  $\vec{j}$  – плотность тока в индукторе;  $h$  – зазор;  $e$  – ширина токопровода;  $\omega$  – частота;  $\sigma$  – электропроводность металла;  $\mu_2\mu_0$  – магнитная проницаемость металла (для немагнитных металлов  $\mu_2 = 1$ );  $\vec{B}_0$  – вектор поляризующего поля;  $k_2$  – волновое число электромагнитной волны.

При этом выражение для сосредоточенного источника, формирующего сдвиговую волну, имеет вид

$$\chi(\theta) = J_{\mu \rightarrow}(\theta) = \frac{\cos\theta(1 - 2\sin^2\theta)}{(2\sin^2\theta - 1)^2 + 4\sin^2\theta \cos\theta \sqrt{\gamma^2 - \sin^2\theta}}$$

Соответственно амплитуда колебаний единичного элемента фазированной решетки в случае ЭМАП для поперечной волны при ориентации поляризующего магнитного поля нормально к поверхности ОК имеет вид

$$A_{nV} = \frac{jB_{0Se}}{4\pi\mu r} e^{-k_r h \sin\theta}$$

Следует отметить интересный для практики контроля тонких изделий научный результат, отраженный в работе Мышкина А. В. [21, с.58]: расчетные и экспериментальные данные показали, что сдвиговые волны в начале ближней зоны излучения прямого ЭМАП направлены практически нормально к поверхности ОК и имеют структуру близкую к однородной (рис. 3). Эти данные соответствуют результатам, приведенным в справочнике [4], где утверждается наличие «прожекторного» участка в начале ближней зоны прямого пьезопреобразователя (продольные волны), а также для прямого емкостного излучателя продольных ультразвуковых волн [22]. Следовательно, этот физический эффект является универсальным. Важно, что чувствительность к дефектам в этой зоне будет примерно одинаковой.

Дальнейшее совершенствование теоретических и модельных исследований ЭМАП выполнено в диссертационной работе Алехина С. Г. [23]. Им разработана математическая модель, в которой постоянное поляризующее магнитное поле преобразователя заменено импульсным. Основой импульсного магнита является катушка, намотанная на ферромагнитный сердечник. Это привело к появлению мощных импульсов шумов Баркгаузена значительной длительности (рис. 4). В результате толщинометрия тонких изделий стала невозможной. Автор также утверждает, что при использовании импульсного магнита индукция нормального магнитного поля достигала 2,7 Тл. При этом амплитуда донного сигнала по сравнению с шумом оказалась незначительной. Например, в работе [10] соотношение величины «донный сигнал/шум» превышает 100 раз при подмагничивающем поле до 1 Тл. Следовательно, работы по импульсному подмагничиванию начатые Малинкой А. В., продолженные Сучковым Г. М. [10] и Алехиным С. Г. [23] являются перспективными и их необходимо продолжать.

Изучая последние известные зарубежные публикации следует отметить, что в теоретическом плане зарубежные исследования несколько за-

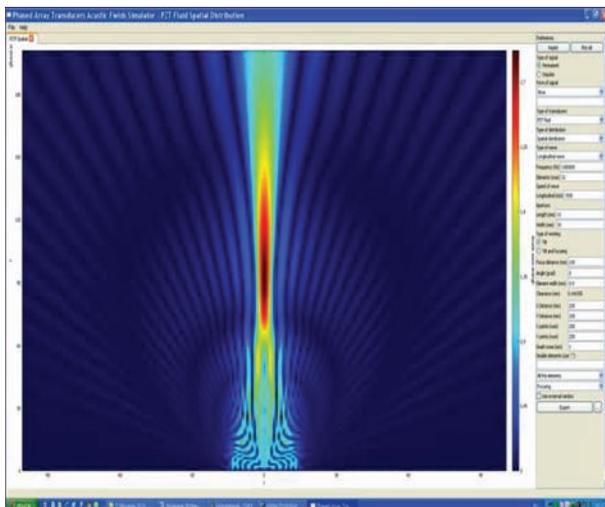


Рис. 3. Диаграмма направленности ЭМАП [21]

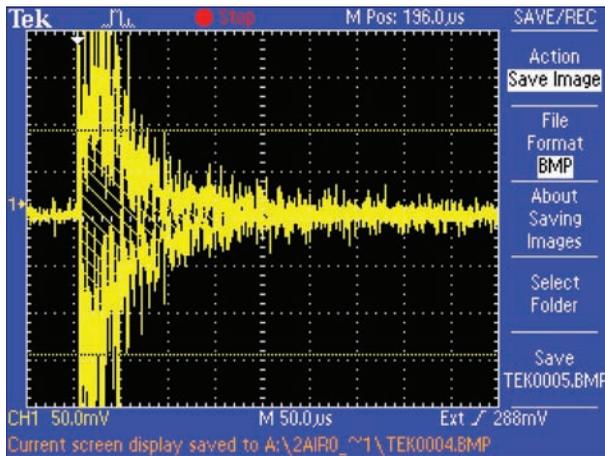


Рис. 4. Шумы Баркгаузена от воздействия импульса магнита [23] паздывают и, по сути, не отличаются от вышеупомянутых по полученным результатам. Они в большей степени посвящены моделированию, направленному на практическое использование результатов при ультразвуковом ЭМА контроле: дефектоскопии, оценке напряженного состояния и химического состава материалов, влиянию температуры.

В заключение следует отметить, что при анализе докладов по ультразвуку на 18-й Всемирной конференции по неразрушающему контролю (2012 г.) Шевалдыкин В. Г. [24] сделал вывод об уменьшении интереса к работам по развитию и использованию ЭМА метода контроля. С другой стороны, в работе [13] Бобров В. Т., Самокрутов А. А. и Шевалдыкин В. Г. утверждают о значительном интересе мировых разработчиков к исследованиям ЭМА преобразования. Анализ результатов сотен теоретических и практических публикаций подтверждает значительный интерес к разработкам ЭМА преобразователей в составе дефектоскопов, толщиномеров, автоматических и автоматизированных установок. Подтверждением полученного вывода является практическое применение ЭМА способа на практике. Например, ООО «Компания Нординкрафт» [25] за 20 лет разработаны, изготовлены и введены в эксплуатацию свыше 70 установок автоматизированного ультразвукового контроля с применением ЭМАП. В настоящее время установки компании «Нординкрафт» работают на крупнейших металлургических и трубных предприятиях России, Украины, Беларуси, Китая, Швеции, Германии, Вьетнама, Южной Кореи, Японии и др. В числе ключевых клиентов компании – ОАО «Северсталь», ОАО «Волжский трубный завод», ОАО «ЧТПЗ», ОАО «Челябинский металлургический комбинат», ОАО «ММК», ОАО «Выксунский металлургический завод», ОАО «Амурметалл», ОАО «Уральская сталь», ОАО «Уралтрубпром», РУП «Белорусский металлургический комбинат», ОАО «Оскольский

электрометаллургический комбинат», ОАО «Алчевский металлургический комбинат» и др. Очевиден высокотехнологический прорыв по внедрению теоретических и практических результатов по ЭМА преобразованию в промышленность.

### Выводы

1. Известные теоретики за последние 20...30 лет преимущественно решали частные задачи по «механизмам» ЭМА преобразования, в то время как промышленности необходимы разработки принципов и основ построения новых ЭМАП и специального оборудования. На сегодня по-прежнему не существует обобщенной теории ЭМА преобразования, которая бы комплексно учитывала все свойства контролируемого материала, поверхность или объем которого является элементом ЭМА преобразователя: электропроводность, магнитные, упругие и пьезомагнитные характеристики, структуру и анизотропию, наличие деформаций и упругих напряжений, форму поверхности и др., а также конструкцию элементов ЭМАП (высокочастотной катушки или катушек, источника или источников магнитного поля и др.).

2. Теоретически обоснованы и разработаны первые модели устройства с фазированными элементами на базе ЭМА преобразователей, что позволяет выполнять высокопродуктивный контроль качества сварных швов.

3. Выполнены теоретические и практические исследования, по результатам которых разработаны портативные ЭМА толщиномеры с импульсным поляризирующим магнитным полем. Это дает возможность существенно упростить технологию бесконтактного контроля ферромагнитных изделий.

### Список литературы

1. Буденков Г. А., Гуревич Ю.С. (1981) Современное состояние бесконтактных методов и средств ультразвукового контроля (Обзор). *Дефектоскопия*, 5, 5–33.
2. Сучков Г. М. (2005) Современные возможности ЭМА дефектоскопии. *Там же*, 12, 24–39.
3. Сучков Г. М. (2004) Возможности современных ЭМА-толщиномеров. *Там же*, 12, 16–25.
4. Ермолов И. Н., Ланге Ю. В. (2004) *Неразрушающий контроль: справочник: В 7 т.* В. В. Клюев (ред.). Ультразвуковой контроль. Т. 3. Москва, Машиностроение.
5. Ермолов И. Н. (2004) Достижения в теоретических вопросах ультразвуковой дефектоскопии, задачи и перспективы. *Дефектоскопия*, 10, 13–48.
6. Сазонов Ю. И. (2014) Электромагнитно-акустические эффекты в конденсированных средах и физические методы их использования. *XXVII сессия Российского акустического общества, посв. памяти ученых-акустиков ФГУП «Крыловский государственный научный центр» А. В. Смолякова и В. И. Попкова. С.-Петербург, 16–18 апреля 2014.*
7. Буденков Г. А., Коробейников О. В. (2009) Влияние химического состава и температуры металлов на эффективность электромагнитно-акустического преобразования. *Дефектоскопия*, 4, 41–49.

8. Сучков Г. М., Донченко А. В., Десятниченко А. В. и др. (2008) Повышение чувствительности ЭМА приборов. *Там же*, **2**, 15–22.
9. Сучков Г. М. (2001) Исследование особенностей распространения упругих волн, возбуждаемых ЭМА способом. *Контроль. Диагностика*, **12**, 36–39.
10. (2005) *Развитие теории и практики создания приборов для электромагнитно-акустического контроля металлоизделий*: докт. дис. Харьков, НТУ «ХПИ».
11. Ремезов В. Б. (2013) Исследование акустических полей, возбуждаемых излучателем типа «виток» в постоянном магнитном поле. *Дефектоскопия*, **6**, 13–25.
12. Мигущенко Р. П., Сучков Г. М., Петрищев О. Н. и др. (2017) Информационно-измерительные электроакустические преобразователи для оценки качества поверхности ферромагнитных металлоизделий ультразвуковыми волнами Релея. *Технічна електродинаміка*, **2**, 70–76.
13. Бобров В. Т., Самокрутов А. А., Шевальдыкин В. Г. (2014) Состояние и тенденции развития акустических (ультразвуковых) методов, средств и технологий неразрушающего контроля и технической диагностики. *Территория NDT*, **2**, 24–27.
14. Чабанов В. Е., Жуков В. А. (2013) Особенности ультразвукового контроля с применением электромагнитно-акустических преобразователей. *В мире неразрушающего контроля*, **1**, 36–43.
15. Плеснецов С. Ю., Петрищев О. Н., Мигущенко Р. П., Сучков Г. М. (2017) Моделирование процесса электромагнитно-акустического преобразования при возбуждении крутильных волн. *Технічна електродинаміка*, **3**, 79–88.
16. Plesnetsov S. Yu., Petrishchev O. N., Mygushchenko R. P., Suchkov G. M. (2018) Simulation of electromagnetic-acoustic conversion process under torsion waves excitation. Part 2. *Tekhnichna Elektrodynamika*, **1**, 30–36.
17. Plesnetsov S. Yu., Petrishchev O. N., Mygushchenko R. P., Suchkov G. M. (2018) Simulation of electromagnetic-acoustic conversion process under torsion waves excitation. Part 3. *Ibid*, **3**, 10–19.
18. Сучков Г. М., Петрищев О. Н., Плеснецов С. Ю. (2016) *Разработка основ электромагнитно-акустического возбуждения крутильных волн в трубчатых металлоизделиях. Тезисы XXII Міжнародної н.-пр. конф. «Фізичні та комп'ютерні технології», 7–9 грудня 2016 р., Харків*, сс. 469–473.
19. Plesnetsov S. Yu., Migushchenko R. P., Petryshchev O. N. et al. (2017) Mathematical modeling of physical processes of electromagnetic field transformation in elastic oscillations field in microthick layers of metals. *Journal of nano- and electronic physics*, **9**, 5.
20. Plesnetsov S. Yu., Petrishchev O. N., Mygushchenko R. P. et al. (2018) Physical principles of non-contact ultrasonic frequency sensors creation for the study of nanocrystalline ferromagnetic materials. *Ibid*, **2**. (Preprint).
21. Мышкин А. В. (2015) *Влияние конструктивных параметров многоэлементных фазированных преобразователей на формирование акустических полей*: автореф. канд. дис. Ижевск, ИЖГТУ.
22. Ноздрачева Е. Л., Сучков Г. М., Петрищев О. Н. (2015) Особенности возбуждения ультразвуковых импульсов емкостным преобразователем. *Зб. наук. праць Донецького національного технічного університету, серія: «Обчислювальна техніка та автоматизація»*, сс. 165–171.
23. Алехин С. Г. (2013) *Толициметрия металлоконструкций на основе электромагнитно-акустического преобразования в импульсном магнитном поле*: канд. дис. Москва, МНПО «Спектр».
24. Шевальдыкин В. Г. (2012) Краткий анализ тем докладов по ультразвуку 18-й Всемирной конференции по неразрушающему контролю. *Территория NDT*, **3**, 33–34.
25. www.nordinkraft.de
1. Budenkov, G.A., Gurevich, Yu.S. (1981) Modern state of contactless methods and means of ultrasonic testing (Review). *Defektoskopiya*, **5**, 5-33 [in Russian].
2. Suchkov, G.M. (2005) Modern capabilities of EMA flaw detection. *Ibid.*, **12**, 24-39 [in Russian].
3. Suchkov, G.M. (2004) Capabilities of modern EMA thickness meters. *Ibid.*, **12**, 16-25 [in Russian].
4. Ermolov, I.N., Lange, Yu.V. (2004) *Nondestructive testing: Refer. book. In: 7 Vol. Ed. by Klyuev. Vol.3: Ultrasonic testing*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
5. Ermolov, I.N. (2004) Achievements in theoretical problems of ultrasonic flaw detection, objectives and prospects. *Defektoskopiya*, **10**, 13-48 [in Russian].
6. Sazonov, Yu.I. (2014) Electromagneto-acoustic effects in condensed media and physical methods of their application. *In: Proc. of 27th Session of the Russian Acoustic Society dedicated to the memory of acoustic-scientists A.V. Smolyakov and V.I. Popkov of FGUP Krylov State Scientific Center (St.-Petersburg, 16-18 April 2014)* [in Russian].
7. Budenkov, G.A., Korobejnikov, O.V. (2009) Influence of metal composition and temperature on effectiveness of electromagneto-acoustic transformation. *Defektoskopiya*, **4**, 41-49 [in Russian].
8. Suchkov, G.M., Donchenko, A.V. et al. (2008) Improvement of efficiency of EMA instruments. *Ibid.*, **2**, 15-22 [in Russian].
9. Suchkov, G.M. (2001) Investigation of the features of propagation of elastic waves excited by EMA method. *Kontrol. Diagnostika*, **12**, 36-39 [in Russian].
10. (2005) *Advances of the theory and practice of development of instruments for electromagneto-acoustic testing of metal products*. In: Syn. of Thesis for Dr. of Techn. Sci. Degree. Kharkov, NTU KhPI [in Russian].
11. Remezov, V.B. (2013) Investigation of acoustic fields excited by “coil” type radiators in a constant magnetic field. *Defektoskopiya*, **6**, 13-25 [in Russian].
12. Migushchenko, R.P., Suchkov, G.M., Petrishchev, O.N. et al. (2017) Information-measurement electromechanical transducers for assessment of surface quality of ferromagnetic metal products by ultrasonic Rayleigh waves. *Tekhnichna Elektrodynamika*, **2**, 70-76 [in Russian].
13. Bobrov, V.T., Samokrutov, A.A., Shevaldykin, V.G. (2014) State and tendencies of development of acoustic (ultrasonic) methods, means and technologies of nondestructive testing and technical diagnostics. *Territoriya NDT*, **2**, 24-27 [in Russian].
14. Chabanov, V.E., Zhukov, V.A. (2013) Features of ultrasonic testing with application of electromagneto-acoustic transducers. *V Mire Nerazrush. Kontrolya*, **1**, 36-43 [in Russian].
15. Plesnetsov, S.Yu., Petrishchev, O.N., Mygushchenko, R.P., Suchkov, G.M. (2018) Simulation of electromagneto-acoustic conversion process under torsion waves excitation. *Tekhnichna Elektrodynamika*, **3**, 79-88 [in Russian].
16. Plesnetsov, S.Yu., Petrishchev, O.N., Mygushchenko, R.P., Suchkov, G.M. (2018) Simulation of electromagneto-acoustic conversion process under torsion waves excitation. Pt. 2. *Ibid.*, **1**, 30-36 [in Russian].
17. Plesnetsov, S.Yu., Petrishchev, O.N., Mygushchenko, R.P., Suchkov, G.M. (2018) Simulation of electromagneto-acoustic conversion process under torsion waves excitation. Pt. 3. *Ibid.*, **3**, 10-19 [in Russian].
18. Suchkov, G.M., Petrishchev, O.N., Plesnetsov, S.Yu. (2016) *Development of fundamentals of electromagneto-acoustic excitation of torsion waves in tubular metal products. In: Abstr. of Papers of 22nd Int. Sci.-Pract. Conf. on Physical and Computer Technologies (7-9 December 2016, Kharkiv)*, 469-473.
19. Plesnetsov, S.Yu., Migushchenko, R.P., Petryshchev, O.N., et al. (2017) Mathematical modeling of physical processes of electromagnetic field transformation in elastic oscillations field in microthick layers of metals. *J. of Nano- and Electronic Physics*, **9**, 5.
20. Plesnetsov, S.Yu., Petrishchev, O.N., Mygushchenko, R.P. et al. (2018) Physical principles of non-contact ultrasonic frequency sensors creation for the study of nanocrystalline ferromagnetic materials. *Ibid.*, **2**.
21. Myshkin, A.V. (2015) *Influence of design parameters of multielement phased transducers on formation of acoustic*

References

- fields. *Syn. of Thesis for Cand. of Techn. Sci. Degree.* Izhevsk, IzhGTU [in Russian].
22. Nozdrachyova, E.L., Suchkov, G.M., Petrishchev, O.N. (2015) Features of excitation of ultrasonic pulses by a capacitive transducer. In: *Transact. of DNTU, Series: Computational systems and automation*, 165-171 [in Russian].
  23. Alyokhin, S.G. (2013) *Thickness measurement in metal structures based on electromagneto-acoustic transformation in a pulse magnetic field. Syn. of Thesis for Cand. of Tekhn. Sci. Degree.* Moscow, MNPO Spektr [in Russian].
  24. Shevaldykin, V.G. (2012) Brief analysis of the topics of presentations on ultrasound at the 18th World Conf. on Nondestructive Testing. *Territoriya NDT*, 3, 33-34 [in Russian].
  25. www.nordinkraft.de

С. Ю. ПЛЕСНЕЦОВ, Г. М. СУЧКОВ, А. И. КОРЖ,  
М. Д. СУВОРОВА

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут. 61002, м. Харків, вул. Кирпичева, 2.  
E-mail: hpi.suchkov@gmail.com

НОВІ ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ І РОЗРОБКИ В ГАЛУЗІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНО-АКУСТИЧНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ (ОГЛЯД)

Виконано аналіз інформаційних джерел за останні роки, в яких приведені результати теоретичних і модельних досліджень електромагнітно-акустичного способу збудження і прийому ультразвукових хвиль об'ємного, поверхневого і нормального типів. Встановлено, що комплексними теоретичними і модельними дослідженнями створюються більш ефективні основи конструювання ЕМА перетворювачів різного призначення. Показана можливість створення ЕМАП з фазованими

решітками, а також пристроїв з імпульсними джерелами поляризованого магнітного поля. Бібліогр. 25, рис. 4.

Ключові слова: електромагнітно-акустичні перетворення, властивості матеріалів, неруйнівний контроль, вимірювання, діагностика, товщинометрія, моделювання

S. Yu. PLESNETSOV, G. M. SUCHKOV, A. I. KORZH,  
M. D. SUVOROVA

National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute",  
2 Kirpicheva str., 61002, Kharkov.  
E-mail: hpi.suchkov@gmail.com

NEW THEORETICAL INVESTIGATIONS AND DEVELOPMENTS IN THE FIELD OF ELECTROMAGNETO-ACOUSTIC TRANSFORMATION (REVIEW)

Analysis was performed of information sources over the recent years, which give the results of theoretical and model studies of electromagneto-acoustic method of excitation and reception of ultrasonic waves of body, surface and normal types. It is found that comprehensive theoretical and model studies allow establishing more effective principles of design of various purpose EMA transducers. The possibility of development of EMAT with phased arrays, as well as devices with pulsed sources of polarizing magnetic field is shown. 25 References 25, 4 Figures.

Keywords: electromagneto-acoustic transformation, material properties, nondestructive testing, measurement, diagnostics, thickness measurement, modeling

Поступила в редакцію  
24.04.2018

ДЕВЯТАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
«Математическое моделирование и  
информационные технологии в сварке  
и родственных процессах»

Посвящается 100-летию Национальной академии наук Украины

Украина, Одесса, отель «Курортный»  
10 – 14 сентября 2018 г.



Национальная академия наук Украины  
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ  
Международная Ассоциация «Сварка»

Для участия в конференции необходимо заполнить регистрационную карточку и вместе с тезисами доклада направить ее в Оргкомитет до 20 июня 2018 г. К началу конференции будут изданы тезисы докладов.

Сборники трудов восьми предыдущих конференций «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах» на сайте: <http://patonpublishinghouse.com/rus/proceedings>

Оргкомитет

ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины,  
ул. Казимира Малевича 11,  
г. Киев, 03680, Украина;  
тел./факс: (38044) 200-82-77, 205-22-26  
E-mail: [journal@paton.kiev.ua](mailto:journal@paton.kiev.ua)  
<http://pwi-scientists.com/rus/mmi2018>

Контрольные даты

|  |                  |
|--|------------------|
| Подача заявок на участие и тезисов докладов                        | до 20.06.2018 г. |
| Рассылка второго информационного сообщения и подтверждение участия | до 12.07.2018 г. |
| Оплата регистрационного взноса                                     | до 11.09.2018 г. |