

Секция 2. Приборы в промышленности, неразрушающем контроле, здравоохранении и экологии

УДК 620.179.16

А. Ф. Башарова¹, А. А. Наговицын¹, аспиранты

О. В. Муравьева^{1,2}, д-р техн. наук, проф.

E-mail: pmkk@istu.ru

¹ Ижевский государственный технический университет имени

М. Т. Калашникова

² ФГБУН «УдмФИЦ УрО РАН»

Методика расчета эффективности ЭМА-преобразователя продольных волн в условиях дополнительного намагничивания током высокочастотного индуктора

В статье рассматриваются возможности увеличения поля подмагничивания ЭМА-преобразователя продольных волн за счет дополнительного воздействия магнитным полем тока в высокочастотном индукторе. Предложена методика расчета, позволяющая оценить возможности повышения эффективности проходных ЭМА-преобразователей продольных волн для сталей с известными кривыми намагничивания.

Ключевые слова: ультразвук, эффективность электромагнитно-акустического преобразователя, продольная волна, кривая намагничивания.

Введение

Электромагнитно-акустический (ЭМА) метод является одним из перспективных для возбуждения-приема ультразвуковых волн при контроле. В качестве основного достоинства данного метода можно выделить бесконтактность, позволяющую отстроиться от качества обработки поверхности объекта контроля, а также возможность возбуждения и приема любых типов волн [1–6]. Несмотря на преимущества ЭМА-метода, его основным недостатком является низкая эффективность преобразования. Увеличения эффективности ЭМА-преобразования достигаются увеличением поля подмагничивания, в том числе с использова-

нием динамического подмагничивания, увеличением напряжения (тока) зондирующего импульса, применением малошумящих схем приемно-усилительного тракта [7–9]. В случае излучения-приема продольных волн, требующего касательной компоненты поля постоянного подмагничивания, для повышения эффективности ЭМА-преобразования возможно использование дополнительного подмагничивания током высокочастотного индуктора.

Цель работы: разработка методики расчета эффективности проходного ЭМА-преобразователя продольных волн в условиях дополнительного намагничивания током высокочастотного индуктора.

Используемые подходы

Принцип действия ЭМАП продольных волн в условиях намагничивания полем высокочастотного индуктора показан на рис. 1.

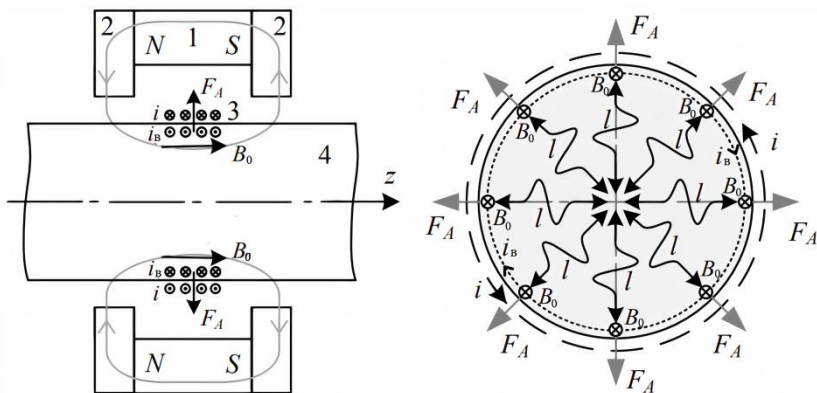


Рис. 1. Принцип действия проходного ЭМАП продольных волн

Проходной ЭМА-преобразователь продольных волн состоит из магнитной системы в виде кольцевого магнита неодим-железо-бор, концентраторов магнитного потока в виде двух ферромагнитных шайб, формирующей постоянное поле подмагничивания B_0 и катушки индуктивности, возбуждающей в объекте контроля вихревые токи, текущие в тонком приповерхностном слое.

Возбуждение акустических волн ЭМА-преобразователем происходит за счет электродинамического эффекта (силы Ампера), определяемого взаимодействием вихревых токов i_v длиной dl с индукцией поля подмагничивания B_0 в пределах скин-слоя [10, 11]:

$$F_A = dl \left[\vec{i}_e \cdot \vec{B}_0 \right]. \quad (1)$$

При ориентации поля подмагничивания B_0 в осевом направлении и вихревых токов i_e – по периметру цилиндра возможно возбуждение продольных волн во всех радиальных направлениях в поперечном сечении цилиндра.

Прием импульсов, многократно переотраженных по диаметру цилиндра, происходит за счет появления ЭДС индукции ε_i в катушке за счет колебаний приповерхностного слоя объекта со скоростью V в поле подмагничивания с индукцией B_0 [10,11]:

$$j = \sigma [V \cdot B_0], \quad (2)$$

где σ – электропроводность.

Формируемый магнитным полем высокочастотного индуктора вихревой ток создает собственное магнитное поле ΔH , которое при условии синфазного включения смещает точку на кривой намагничивания $B(H)$ из B_0 в точку $(B_0 + \Delta B_0)$, что может привести к повышению эффективности ЭМА-преобразования (рис. 2). Последнее определяется положением точки B_0 на кривой начального намагничивания и величиной поля ΔH [12, 13].

Расчет возможности повышения эффективности проходного ЭМА-преобразователя продольных волн проведен для образца из стали 40X (закалка 860 °С, отпуск 400 °С).

Использован следующий алгоритм расчета:

– На кривой намагничивания $B(H)$ выбирается точка, которая соответствует значению напряженности внешнего постоянного магнитного поля H_0 .

– В условиях синфазного включения высокочастотного индуктора с амплитудой внешнего импульсного поля ΔH определяется прирост магнитной индукции ΔB относительно точки B_0 .

– Проводится расчет зависимости прироста магнитной индукции ΔB от величины прироста внешнего поля ΔH на различных участках кривой намагничивания.

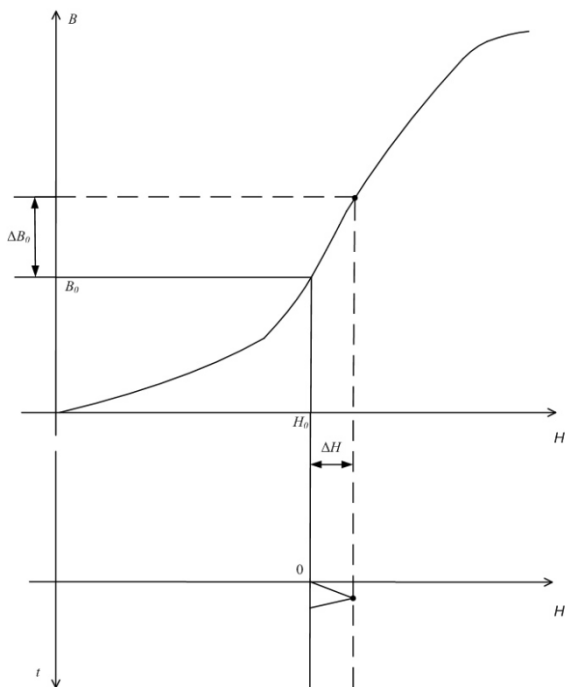


Рис. 2. Зависимость приращения индукции ΔB от прироста внешнего поля ΔH за счет дополнительного намагничивания

Результаты и их обсуждение

Зависимость величины прироста магнитной индукции ΔB от положения точки постоянного подмагничивания B_0 на кривой намагничивания $B(H)$ при различных значениях поля подмагничивания высокочастотным индуктором ΔH приведена на рис. 3.

Видно, что максимальный прирост магнитной индукции ΔB изменяется в диапазоне от 0,07 до 0,7 Тл при различных значениях прироста внешнего импульсного поля ΔH , причем максимум наблюдается в относительно малых полях до 5000 А/м и соответствует области максимума дифференциальной магнитной проницаемости. Таким образом, при небольших полях постоянного намагничивания использование дополнительного воздействия синфазным магнитным полем высокочастотного индуктора позволяет в области, далекой от насыщения, получить суще-

ственный прирост эффективности ЭМА-преобразования: при $\Delta H = 500$ А/м – на 12 % и при $\Delta H = 1000$ А/м – на 24 % (при $H = 2500$ А/м).

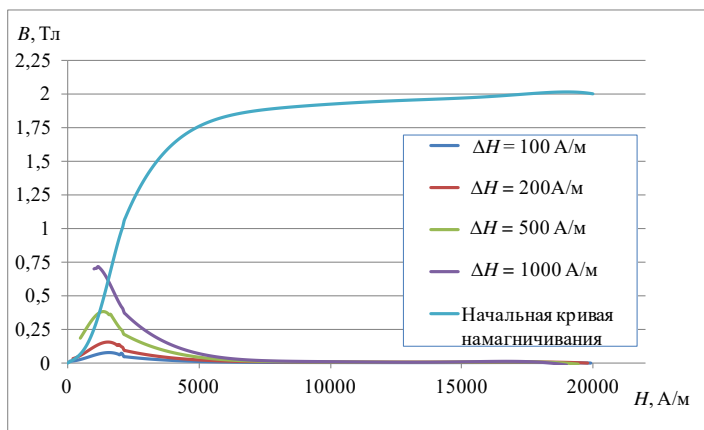


Рис. 3. Зависимость величины прироста магнитной индукции ΔB от положения точки постоянного подмагничивания B_0 на кривой намагничивания $B(H)$ при различных значениях поля подмагничивания высокочастотным индуктором ΔH

Выводы

Разработанная методика расчета позволяет оценить возможности повышения эффективности проходных ЭМА-преобразователей продольных волн для сталей с известными кривыми намагничивания и оптимизировать параметры поля постоянного подмагничивания. Результаты расчетов эффективности ЭМА-преобразователя продольных волн в условиях дополнительного намагничивания током высокочастотного индуктора показали, что выбор оптимального поля подмагничивания позволяет получить большую эффективность в сравнительно малых полях, соответствующих максимуму дифференциальной магнитной проницаемости.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации (проект № 1.2405.2017/4.6) с использованием УНУ «Информационно-измерительный комплекс для исследований акустических свойств материалов и изделий» (рег. номер: 586308).

Список литературы

1. *Бабкин, С. Э.* Определение скорости основных типов акустических волн в металлах приставным датчиком / С. Э. Бабкин // Дефектоскопия. – 2020. – № 4. – С. 32–39.
2. *Стрижак, В. А.* Особенности возбуждения электромагнитно-акустического преобразователя при волноводном методе контроля / В. А. Стрижак, Р. Р. Хасанов, А. В. Пряхин // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2018. – Т. 21, № 2. – С. 159–166.
3. *Комаров, В. А.* Магнитоупругое электромагнитно-акустическое преобразование. Ч. 3. Двойное преобразование / В. А. Комаров // Контроль. Диагности-ка. – 2018. – № 4. – С. 20–29.
4. *Муравьев, В. В.* Неразрушающий контроль внутренних напряжений в рельсах при изготовлении с использованием метода акустоупругости / В. В. Муравьев, К. А. Тапков, С. В. Леньков // Дефектоскопия. – 2019. – № 1. – С. 10–16.
5. Акустическая структуроскопия стальных образцов, нагруженных изгибом с вращением при испытаниях на усталость / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, А. Ю. Будрин, М. А. Синцов, А. В. Зорин // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2019. – Т. 22, № 1. – С. 37–44.
6. *Будрин, А. Ю.* Влияние термической обработки на скорость распространения поперечных волн в стальных прутках / А. Ю. Будрин // Интеллектуальные системы в производстве. – 2019. – Т. 17, № 4. – С. 12–17.
7. *Толипов, Х. Б.* Возможности повышения эффективности бесконтактного излучателя акустических волн / Х. Б. Толипов // Дефектоскопия. – 2017. – № 4. – С. 71–74.
8. *Злобин, Д. В.* Влияние динамического подмагничивания на эффективность электромагнитно-акустического преобразования при волноводном контроле прутков / Д. В. Злобин, Л. В. Волкова // Приборы и методы измерений. – 2017. – Т. 8, № 3. – С. 236–245.
9. *Буденков, Г. А.* Влияние химического состава и температуры металлов на эффективность электромагнитно-акустического преобразования / Г. А. Буденков, О. В. Коробейникова // Дефектоскопия. – 2009. – № 4. – С. 41–49.
10. *Петров, К. В.* Влияние конструктивных особенностей проходного электромагнитно-акустического преобразователя на результаты контроля цилиндрических объектов / К. В. Петров, М. Ю. Соков, О. В. Муравьева // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2018. – Т. 21, № 2. – С. 135–146.
11. *Петров, К. В.* Моделирование магнитных, электрических и акустических полей проходного преобразователя для контроля цилиндрических объектов / К. В. Петров, О. В. Муравьева, Ю. В. Мышкин, А. Ф. Башарова // Дефектоскопия. – 2019. – № 2. – С. 16–24.
12. *Сандомирский, С. Г.* Анализ влияния режимов термической обработки сталей на их остаточную намагниченность на частных петлях магнитного гистерезиса / С. Г. Сандомирский // Сталь. – 2016. – № 4. – С. 55–59.
13. *Сандомирский, С. Г.* Возможности контроля физико-механических свойств стали 40X по параметрам предельной петли магнитного гистерезиса / С. Г. Сандомирский // Сталь. – 2018. – № 5. – С. 46–50.

A. F. Basharova¹, postgraduate student
A. A. Nagovitsyn¹, postgraduate student
O. V. Murav'eva^{1,2}, DSc in engineering, professor
E-mail: pmkk@istu.ru

¹ Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

² Udmurt Federal Research Center UB RAS, Izhevsk, Russian Federation

Efficiency Calculation of Longitudinal Mode Electromagnetic Acoustic Transducer with Additional Magnetization

The paper deals with the possibility of increasing the magnetization field of the EMA transducer of longitudinal waves due to additional exposure to the current magnetic field of the high-frequency inductor. A new methodology of calculating is proposed to assess the possibilities of increasing the efficiency of EMA-transducers of longitudinal waves for steels with known magnetization curves.

Key words: ultrasound, efficiency of an electromagnetic-acoustic transducer, longitudinal wave, magnetization curve.