

doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-2-376-384

УДК 620.179.162:534.87

Исследование влияния параметров электромагнитно-акустического преобразователя на точность измерения толщины изделий методами численного моделирования

Денис Сергеевич Ашихин^{1✉}, Алексей Владимирович Федоров²

^{1,2} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

¹ ashikhinds@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-3549-113X>

² avfedorov@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0612-922X>

Аннотация

Предмет исследования. Электромагнитно-акустический метод применяется при контроле толщины электропроводящих изделий. Метод основан на электродинамическом взаимодействии вихревых токов, наведенных в электропроводящем материале, с внешним магнитным полем. При генерации акустических сигналов в изделии возникают волны, многократно отраженные от границы раздела сред. Регистрируемый отраженный сигнал позволяет определить толщину изделия. В состав электромагнитно-акустического преобразователя входят: магнитная система, генерирующая и приемная катушки. Точность толщины измеряемого объекта определяется геометрией генерирующей и приемной катушек, а также величиной зазора между ними. Задача экспериментальной оценки влияния геометрии преобразователя на точность измерений толщины достаточно сложна. Для решения проблемы повышения точности преобразователя при электромагнитно-акустической толщинометрии предложена и реализована численная модель распространения акустических волн в проводящей пластине. **Методы.** Численная модель реализована в программной среде COMSOL Multiphysics с применением разрывного метода Галеркина высокого порядка с явной по времени схемой интегрирования. Адекватность модели качественно подтверждена полученными результатами натурального эксперимента. Эксперимент проведен с применением специализированного электромагнитно-акустического толщиномера с преобразователем и мерой толщины. Для оценки неопределенности измерений толщины массив значений принятого сигнала обработан в программной среде MathCad. **Основные результаты.** На основе сравнения результатов моделирования и натурального эксперимента показана адекватность предложенной двумерной модели распространения ультразвуковых волн в пластине. Выполнена оценка влияния конструктивных параметров электромагнитно-акустического преобразователя на точность измерений толщины. Представлены рекомендации по разработке преобразователя и методики измерений толщины объектов контроля. **Практическая значимость.** Полученные результаты могут найти применение при проектировании электромагнитно-акустических преобразователей, предназначенных для неразрушающего контроля толщины изделий.

Ключевые слова

ультразвуковая толщинометрия, электромагнитно-акустический преобразователь (ЭМАП), численное моделирование, распространение ультразвуковых волн, точность измерений толщины

Ссылка для цитирования: Ашихин Д.С., Федоров А.В. Исследование влияния параметров электромагнитно-акустического преобразователя на точность измерения толщины изделий // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 2. С. 376–384. doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-2-376-384

Influence investigation of electromagnetic-acoustic transducer parameters on thickness measurement accuracy by numerical modeling methods

Denis S. Ashikhin¹✉, Alexey V. Fedorov²

^{1,2} ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

¹ ashikhinds@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-3549-113X>

² avfedorov@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0612-922X>

Abstract

The electromagnetic-acoustic method is applied in the control of the electrically conductive products thickness. This method is based on the electrodynamic interaction of eddy currents induced in an electrically conductive material with an external magnetic field. Acoustic waves are generated with multiple reflections from the media interface. The recorded signal reflected allows determining the product thickness. Electromagnetic-acoustic transducer includes a magnetic system, generating and receiving coils. Thickness measurement accuracy of the control object is determined by the geometry of the generating and receiving coils, as well as the size of the gap between them. To assess this effect by the experimental data is rather difficult task. The acoustic wave propagation numerical model in a plate with electromagnetic-acoustic thickness measurement is proposed and developed for the problem solution. The numerical model is implemented in the COMSOL Multiphysics software environment using a discontinuous high-order Galerkin method with time explicit integration scheme. Model adequacy was confirmed using the results of a full-scale experiment, for which a specialized electromagnetic-acoustic thickness gauge with a transducer and a thickness gauge were used. To estimate the uncertainty of thickness measurements, an array of values of the received signal was processed in the MathCad software environment. The adequacy of the model has been confirmed by comparing the simulation results with a full-scale experiment. The influence of the transducer design on the thickness measurement accuracy was estimated. Conclusions are drawn, as well as general recommendations for the development of an electromagnetic-acoustic transducer, and methods for object thickness measuring are given based on the investigation results. The results can be used in the design of an electromagnetic-acoustic transducer and in the development of thickness measurement techniques.

Keywords

ultrasonic thickness measurement, electromagnetic-acoustic transducer (EMAT), numerical modeling, propagation of ultrasonic waves, accuracy of thickness measurements

For citation: Ashikhin D.S., Fedorov A.V. Influence investigation of electromagnetic-acoustic transducer parameters on thickness measurement accuracy by numerical modeling methods. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 2, pp. 376–384. (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-2-376-384

Введение

Развитие цифровой индустрии связано с широкой автоматизацией процессов создания изделий на всех стадиях их жизненного цикла, в том числе и на стадии производства. Управление автоматизированным производственным процессом осуществляется на основе информации, получаемой от средств измерений и контроля. От достоверности измерительной информации зависит безопасность производства и качество продукции [1]. Одними из таких средств измерений, встроенных в автоматизированный процесс производства, выступают средства акустической толщинометрии.

При измерении и контроле толщины изделий из электропроводящих немагнитных материалов широкое применение находит электромагнитно-акустический метод, который осуществляется с помощью электромагнитно-акустических преобразователей (ЭМАП) [2–6]. Данный метод основан на электродинамическом взаимодействии вихревых токов, наведенных в электропроводящем материале, с внешним магнитным полем; генерации, приеме и регистрации акустических волн при многократных отражениях от границы раздела сред.

Одним из основных преимуществ электромагнитно-акустического метода является бесконтактный ввод и прием ультразвуковых волн. Метод также позволяет проводить контроль: через неэлектропроводящие покрытия; при загрязнении; коррозии и значительной кривизне поверхности объекта контроля; при высо-

ких скоростях сканирования (скоростях перемещения ЭМАП относительно объектов контроля); при высоких и низких температурах¹.

Несмотря на перечисленные преимущества, для успешного применения ЭМАП при измерении толщины изделий необходимо решить вопрос, связанный с недостаточным исследованием методов расчета и проектирования элементов ЭМАП с учетом влияния их параметров на точность измерений. Например, на сегодняшний день при проектировании ЭМАП особое внимание уделяется вопросам, связанным с влиянием уровня поля подмагничивания, распределения плотности вихревых токов, зазора между ЭМАП и объектом контроля на уровень полезного сигнала преобразователя [7–9]. Но этих исследований недостаточно для обеспечения достоверности измерительной информации и точности измерения толщины изделий.

Анализ типовых конструкций ЭМАП с разнесенными генерирующей и приемной катушками выявил основные типовые конструктивные параметры преобразователя, влияющие на точность измерений толщины изделий: ширина генерирующей катушки a ; зазор между генерирующей и приемной катушками g ; ширина приемной катушки b (рис. 1) [10, 11].

¹ Сайт компании Ultrakraft [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ultrakraft.ru/ru/technology/emat-vs-piezo> (дата обращения: 11.03.2022).

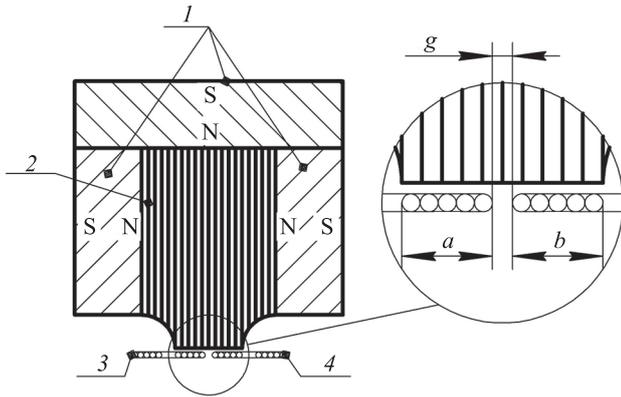


Рис. 1. Типовая конструкция электромагнитно-акустического преобразователя:

1 — постоянные магниты; 2 — магнитопровод; 3 — генерирующая катушка; 4 — приемная катушка; a — ширина генерирующей катушки; g — зазор между генерирующей и приемной катушками; b — ширина приемной катушки

Fig. 1. Typical design of an electromagnetic-acoustic transducer:

1 — permanent magnets; 2 — magnetic core; 3 — generating coil; 4 — receiving coil; a — generating coil width; g — gap between generating and receiving coils; b — receiving coil width

Отметим, что экспериментальная оценка влияния основных типовых конструктивных параметров ЭМАП на точность измерений является многофакторной и достаточно сложной задачей. Один из путей ее решения — проведение численного моделирования распространения акустических волн в объекте контроля, которое в настоящее время широко применяется при разработке средств ультразвукового контроля [7–9].

Цель работы — оценка влияния конструктивных параметров ЭМАП на точность измерения толщины изделия, выполненная с помощью численного моделирования распространения акустических волн в пластине при электромагнитно-акустической толщинометрии.

Результаты оценки могут быть использованы при разработке ЭМАП и методик измерений толщины объекта контроля.

Методика проведения исследований

Конечно-элементная модель процесса распространения ультразвуковых волн базируется на решении дифференциальных волновых уравнений движения упругой среды и реализована в программной среде COMSOL Multiphysics с помощью модуля Elastic Waves Time Explicit. Модуль основан на разрывном методе Галеркина высокого порядка с явной по времени схемой интегрирования.

Описание модели. Численное моделирование акустических полей ЭМАП выполнено в программной среде Comsol Multiphysics для получения развертки по времени принимаемого сигнала. Данная программная среда позволяет решать системы дифференциальных уравнений теории упругости твердого тела методом конечных элементов [12–14].

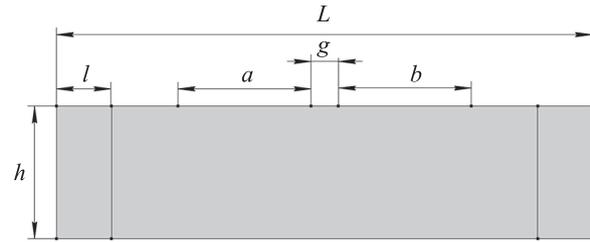


Рис. 2. Геометрия модели бесконечной пластины из алюминиевого сплава:

a и b — ширина границы генерации и приема акустических волн; g — зазор между границей генерации и приема акустических волн; h и L — толщина и ширина пластины; l — ширина поглощающего слоя

Fig. 2. Model geometry of an infinite aluminum alloy plate:

a — width of the acoustic wave generation boundary; g — gap between the acoustic wave generation and reception boundary; b — acoustic wave reception boundary width; h — plate thickness; L — plate width; l — absorbing layer width

В работе использована двумерная модель бесконечной пластины из алюминиевого сплава (рис. 2) толщиной h . Для уменьшения размеров модели и времени вычисления, в модель добавлен «поглощающий слой», ширина l которого задана равной длине продольной волны. «Поглощающий слой» предотвращает отражения акустических волн от границ модели и тем самым устраняет их влияние. В модели используется предположение о том, что генерация и прием акустических волн происходит не в объеме протекания вихревых токов на глубине скин-слоя, а на отрезках a и b соответственно. Потому на границе генерации акустических волн a задана тангенциальная сила, которая соответствует силе Лоренца при электродинамическом механизме генерации. Развертка по времени принимаемого сигнала рассчитана путем сложения по поверхности границы приема b тангенциальной составляющей скорости деформации. Зазор между генерирующей и приемной катушками g задан в виде отрезка с определенной длиной.

График функциональной зависимости тангенциальной силы зондирующего импульса от времени задана согласно выражению:

$$F(t) = \sin(2\pi f(t - t_0)) \exp\left(-\frac{(t - t_0)^2}{\Delta t^2}\right)$$

и представлен на рис. 3. Параметры и значения импульса и физических свойств для модели распространения акустических волн в изделии, приведены в табл. 1.

В табл. 2 приведены конструктивные параметры модели в зависимости от решаемой задачи.

Описание натурального эксперимента. Для оценки адекватности модели применен специализированный толщиномер СИТиЗ¹ (рис. 4). В табл. 3 представлены технические характеристики ЭМАП и характеристики образца пластины, в качестве которой использована мера из алюминиевого сплава.

¹ Номер в госреестре средств измерений Российской Федерации: 84742-22.

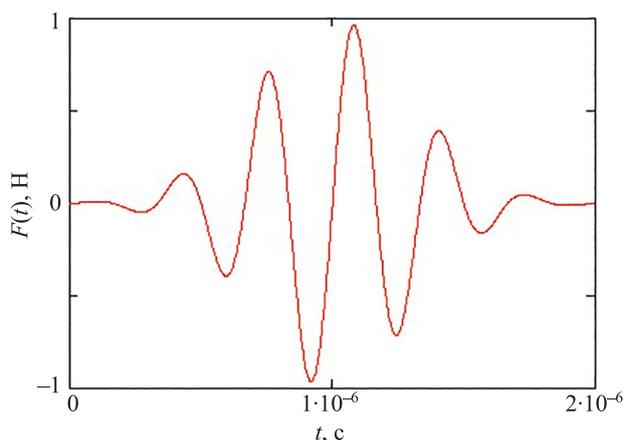


Рис. 3. График зависимости тангенциальной силы зондирующего импульса от времени

Fig. 3. Tangential force dependence graph of the probing pulse versus time

Таблица 1. Параметры зондирующего импульса и физических свойств модели

Table 1. Probing pulse parameters and model physical properties

Параметры		Значения
Импульса	Центральная частота f , Гц	$3 \cdot 10^6$
	Параметр длительности Δt , с	$3 \cdot 10^{-7}$
	Время задержки t_0 , с	$1 \cdot 10^{-6}$
Модели	Плотность ρ , кг/м ³	2700
	Скорость распространения: продольной волны c_p , м/с	6300
	поперечной волны c_s , м/с	3200

Обработка сигнала. Для оценки неопределенности измерений толщины массив значений принятого сигнала обработан в программной среде MathCad. Детектирование донных сигналов проведено по максимумам определенного уровня нормированной по значению в нуле автокорреляционной функции [15]. Выполнена фильтрация найденной матрицы максимумов сигнала для исключения ложного детектирования при условии, что время между каждыми последующими детектируемыми сигналами не должно превышать времени прихода глобального максимума. При фильтрации не учитывались значения автокорреляционной

Таблица 2. Конструктивные параметры модели в зависимости от решаемой задачи

Table 2. Model geometry parameters depending on the problem being solved

Задачи	Конструктивные параметры модели, мм			
	a	b	g	h
Оценка адекватности модели	4,0	4,0	0,5	9,0
Оценка влияния ширины генерирующей катушки a	2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0	—	—	2,0; 10,0
Оценка влияния зазора между генерирующей и приемной катушками g	5,0	5,0	0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0	2,0; 10,0
Оценка влияния ширины приемной катушки b	5,0	2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0	0,5	2,0; 10,0

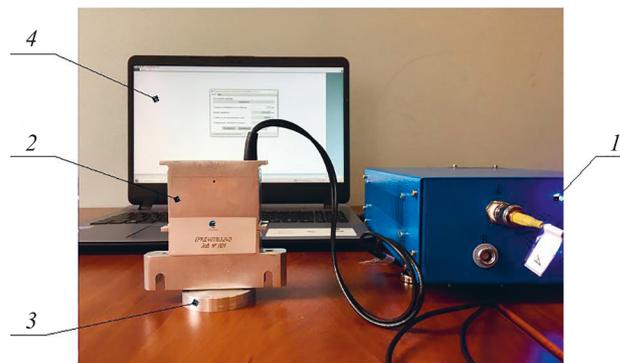


Рис. 4. Толщиномер СИТиЗ:

1 — электронный блок толщиномера СИТиЗ; 2 — ЭМАТ; 3 — мера толщины; 4 — персональный компьютер

Fig. 4. Thickness gauge: 1 — electronic unit of the thickness gauge; 2 — EMAT; 3 — thickness measure; 4 — personal computer

функции в нуле, с точностью до пяти отсчетов дискретизации $2 \cdot 10^{-9}$ с.

Результаты исследований и их обсуждение

Оценка адекватности модели. На первом этапе исследований выполнена оценка адекватности модели на основе сравнения разверток ультразвуковых волн в разные моменты времени с учетом их трансформации (рис. 5), полученные по результатам моделирования и натурального эксперимента, где: S и P — поперечная и продольная ультразвуковые волны, отраженные от лицевой стороны; S_B и P_B — поперечная и продольная ультразвуковые волны, отраженные от дна. Расшифровка пришедших импульсов на развертке выполнена с помощью цветовой карты распространения ультразвуковых волн в модели в различные моменты времени (рис. 6). Для того чтобы отличить продольную (S_B) и поперечную (P_B) волны, результаты моделирования представлены в виде квадратного корня второго инварианта напряжений, умноженного на его знак.

Результаты моделирования и натурального эксперимента качественно совпадают. Из этого следует вывод об адекватности применяемой модели.

Оценка влияния ширины генерирующей катушки. Анализ результатов моделирования (рис. 7) показал, что с увеличением значений ширины генерирующей

Таблица 3. Технические характеристики используемых ЭМАП и меры
 Table 3. Technical characteristics of the EMAPs used and its measures

Характеристика		Значение
ЭМАП	Центральная частота импульса f , Гц	$3 \cdot 10^6$
	Параметр длительности импульса Δt , с	$3 \cdot 10^{-7}$
	Ширина генерирующей катушки a , мм	4,0
	Ширина границы приема акустических волн b , мм	4,0
	Зазор между генерирующей и приемной катушками g , мм	0,5
Образца пластины (меры)	Толщина, мм	9,010
	Стандартная неопределенность измерений, мм	0,005
	Плотность ρ , кг/м ³	2713
	Скорость распространения: продольной волны c_p , м/с	6304
	поперечной волны c_s , м/с	3209

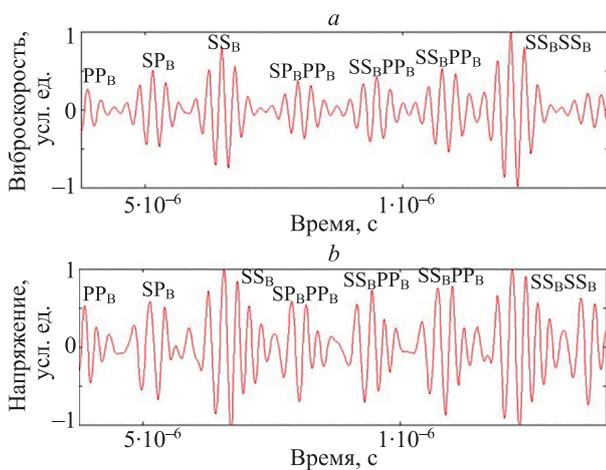


Рис. 5. Развертка по времени принимаемого сигнала при толщине образца 9 мм: полученная по результатам моделирования (а) и натурального эксперимента (б)

Fig. 5. Time sweep of the received signal with a sample thickness of 9 mm: obtained from the results of modeling (a) and full-scale experiment (b)

катушки a уменьшаются значения ошибки измерения толщины, а с увеличением диапазона измерений толщины — увеличиваются.

Видно, что параметр a влияет на значения среднеквадратического отклонения (СКО) результатов измерения толщины по одной развертке. В случае, когда СКО меньше неопределенности измерений толщины, связанной с дискретизацией развертки (рис. 7, б), этим фактором можно пренебречь.

Отметим, что ошибка измерений толщины, особенно при больших диапазонах измерений, связана с изменением типа волны по фронту от плоской к сферической при ее распространении между двумя границами раздела сред. Это обусловлено тем, что фазовая скорость волны начинает превышать групповую скорость, появляется эффект так называемого «дифракционного ускорения» и, как следствие, измеренное значение оказывается меньше номинального (заданного) [16]. С увеличением ширины источника (величины a) влияние данного эффекта на результаты измерений уменьшается.

Полученные результаты оценки необходимо учитывать при проведении процедуры калибровки толщиномера. Необходимо по возможности уменьшать диапазон измерений толщины и выполнять калибровку на мерах с номинальной толщиной среднего значения диапазона измерений, что уменьшит влияние эффекта «дифракционного ускорения» на результаты измерений.

Оценка влияния зазора между генерирующей и приемной катушками. При разработке ЭМАП с разнесенными генерирующей и приемной катушками необходимо изолировать их друг от друга с учетом возможного пробоя диэлектрика. Исходя из этого, величина зазора между генерирующей и приемной катушками g должна быть не менее расчетного значения при условии отсутствия пробоя диэлектрика.

Анализ полученных при моделировании разверток принимаемого сигнала по времени (рис. 8) позволяет сделать следующие выводы:

- 1) амплитуда первого принятого сигнала не является глобальным максимумом;
- 2) максимальная амплитуда у сигнала, который приходит после нескольких переотражений от границ раздела сред. Это связано не только с наличием ближней зоны Френеля, но и с разнесением генерирующей и принимающей катушек — при увеличении параметра g глобальный максимум смещается вправо;
- 3) сигнал с максимальной амплитудой приходит тогда, когда ширина фронта волны полностью перекрывает ширину принимающей катушки;
- 4) первые пришедшие сигналы перед глобальным максимумом имеют сферический фронт, и поэтому для уменьшения влияния эффекта «дифракционного ускорения» на точность измерений толщины их можно не учитывать.

Результаты моделирования показывают, что с увеличением величины g увеличивается ошибка измерений толщины (рис. 9). Заметим, что, начиная отсчет измерений толщины от глобального максимума развертки, происходит снижение ошибки измерений.

Заметим, что по результатам моделирования (рис. 9) можно сделать вывод об отсутствии влияния фактора

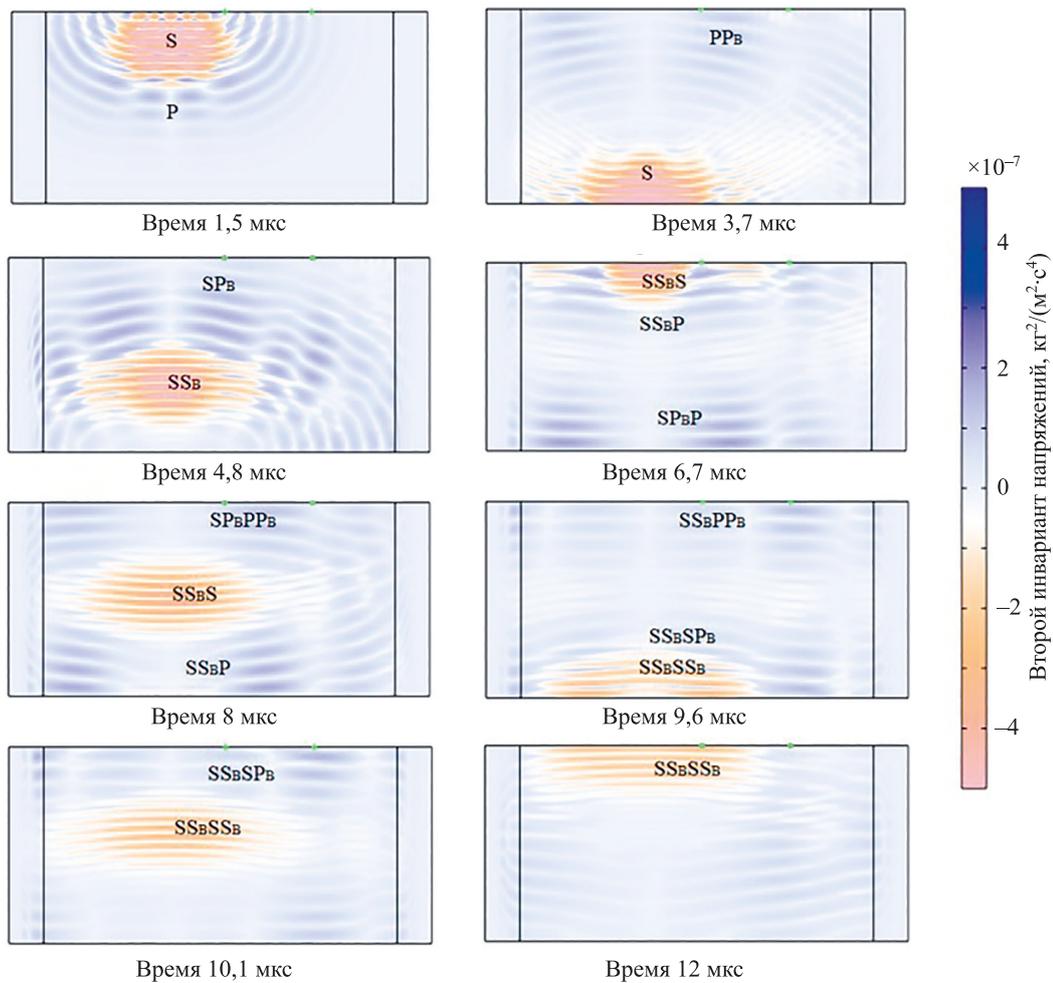


Рис. 6. Цветовые карты распространения ультразвуковых волн в модели в различные моменты времени: S и P — поперечная и продольная ультразвуковые волны, отраженные от лицевой стороны; S_В и P_В — поперечная и продольная ультразвуковые волны, отраженные от дна (обозначения волн представлены в порядке их отражения от границ раздела сред)

Fig. 6. Color maps of ultrasonic wave propagation in the model at different moments: S — transverse ultrasonic wave reflected from the front side; P — longitudinal ultrasonic wave reflected from the front side; S_B — transverse ultrasonic wave reflected from the bottom; P_B — longitudinal ultrasonic wave reflected from the bottom (in the figure, the wave designations are presented in the order of their reflection from the interface of media)

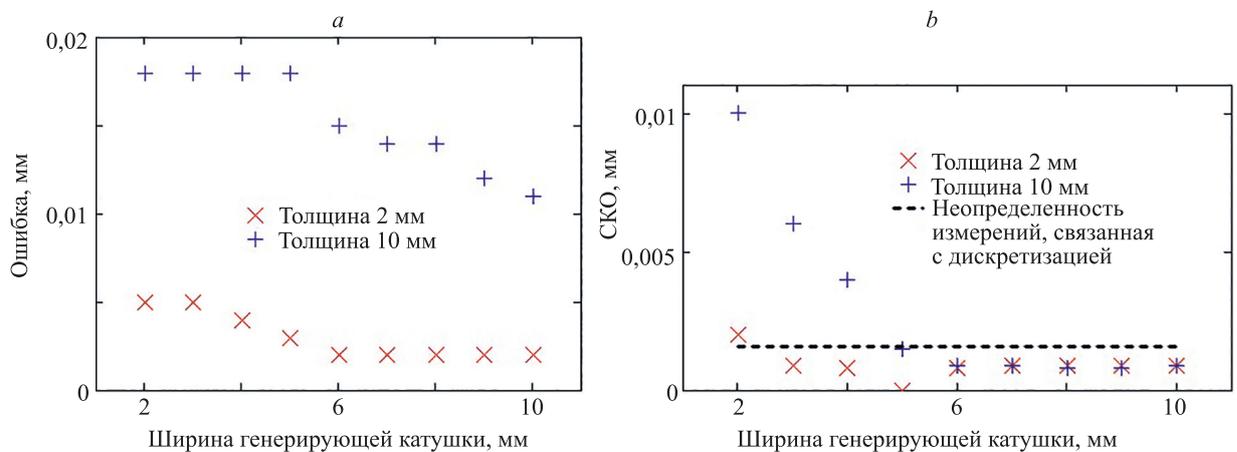


Рис. 7. Графики зависимости: ошибки измерений толщины пластины от ширины генерирующей катушки (a) и среднеквадратичного отклонения от ширины катушки (b) при различной толщине пластины

Fig. 7. Graph of the thickness measurement error versus the generating coil width (a) and graph of the standard deviation versus the generating coil width (b)

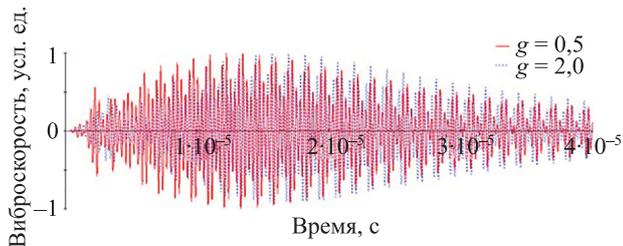


Рис. 8. Развертка по времени принимаемого сигнала при толщине образца 2 мм (ширина генерирующей катушки $a = 5$ мм; g — зазор между генерирующей и приемной катушками; ширина границы приема акустических волн $b = 5$ мм)

Fig. 8. Time sweep of the received signal with a sample thickness of 2 mm (generating coil width $a = 5$ mm; gap between the generating and receiving coils g ; acoustic wave reception boundary width $b = 5$ mm)

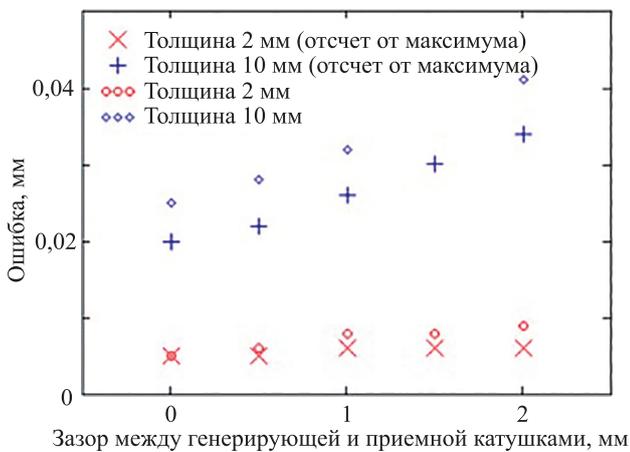


Рис. 9. Графики зависимости ошибки измерений толщины от зазора между генерирующей и приемной катушками при толщинах: 2 мм и 10 мм с отчетами от максимума и учета всего сигнала

Fig. 9. Graphs of the thickness measurement error versus the gap between the generating and receiving coils g : at a thickness of 2 mm with a report from the maximum; at a thickness of 10 mm with a report from the maximum; at a thickness of 2 mm and accounting for the entire signal; at a thickness of 10 mm and accounting for the entire signal

«V-пути»¹. Этот фактор должен увеличивать измеренное значение (увеличивается путь прохождения), но из результатов моделирования видно, что при увеличении величины g измеренное значение толщины уменьшается. Данный вывод также подтверждается в работе [10].

Оценка влияния ширины приемной катушки.

Согласно полученным результатам моделирования (рис. 10), влиянием параметра b на ошибку измерений толщины можно пренебречь. Ширину приемной катушки следует выбирать только из учета соотношения полезного сигнала к шуму для обеспечения надежного детектирования принимаемых импульсов.

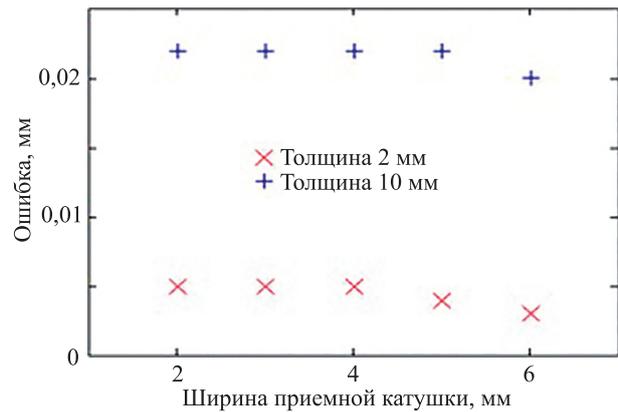


Рис. 10. Графики зависимости ошибки измерений толщины от ширины приемной катушки b

Fig. 10. Graphs of thickness measurement error versus the receiving coil width b

Заключение

В работе показана адекватность разработанной двумерной численной модели распространения акустических волн в пластине при электромагнитно-акустической толщинометрии.

На основе модели проведены исследования влияния основных типовых конструктивных параметров электромагнитно-акустического преобразователя на точность измерений толщины и сформулированы следующие выводы и рекомендации.

1. Уменьшение ширины генерирующей катушки и диапазона измерений толщины объекта контроля приводит к увеличению ошибки измерения толщины изделий. Причем разница между полученной и заданной толщинами — отрицательная. Это связано с изменением типа волны по фронту от плоской к сферической при ее распространении между двумя границами раздела сред. Происходит так называемый эффект «дифракционного ускорения», который для повышения точности измерений толщины следует учитывать при разработке преобразователя. Точность повышается за счет увеличения ширины генерирующей катушки, уменьшения диапазона измерений при использовании калибровочных мер, а также увеличения частоты ультразвуковых импульсов.
2. Увеличение зазора между генерирующей и приемной катушками влияет на точность измерений толщины из-за неопределенности времени прихода между первыми ультразвуковыми сигналами до глобального максимума, а не из-за увеличения пути пробега ультразвуковых волн (фактор «V-пути»). В алгоритме измерений необходимо учитывать только ультразвуковые сигналы с глобальным максимумом.
3. Ширина приемной катушки не влияет на ошибку измерений толщины изделий. При разработке электромагнитно-акустического преобразователя данный параметр следует выбирать только из учета соотношения полезного сигнала к шуму для обеспечения надежного детектирования принимаемых акустических импульсов.

¹ ГОСТ Р 16809-2015 Контроль неразрушающий. Контроль ультразвуковой. Измерение толщины. Введен 01.03.2016. М.: Стандартинформ, 2015. 48 с.

Результаты исследования могут быть использованы при проектировании электромагнитно-акустического

преобразователя и разработке методик измерений толщины изделий.

Литература

1. Гоголинский К.В., Сяско В.А. От неразрушающего контроля к мониторингу состояния. Тенденции развития цифровой экономики // В мире неразрушающего контроля. 2020. Т. 23. № 1. С. 4–8. <https://doi.org/10.12737/1609-3178-2020-4-8>
2. Krautkrämer J., Krautkrämer H. *Ultrasonic Testing Of Materials*. Springer Science & Business Media, 2013.
3. Hirao M., Ogi H. *Electromagnetic Acoustic Transducers*. Springer, 2017. 380 p. <https://doi.org/10.1007/978-4-431-56036-4>
4. Rieger K., Erni D., Rueter D. Noncontact reception of ultrasound from soft magnetic mild steel with zero applied bias field EMATs // *NDT & E International*. 2022. V. 125. P. 102569. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2021.102569>
5. Варочко А.Г., Кузнецов С.В., Половцев В.А., Саратов Н.Н., Прохорович В.Е., Быченко В.А. История становления и перспективы развития технологии сварки трением с перемешиванием в АО «ГКНПЦ им. МВ Хруничева» // *Технология машиностроения*. 2021. № 4. С. 16–41. <https://doi.org/10.34641/TM.2021.226.4.012>
6. Ашихин Д.С., Беркутов И.В., Степанова К.А., Котовщиков И.О., Федоров А.В., Свитнев И.В., Яковлев Ю.О., Быченко В.А. Обеспечение качества стыковых алюминиевых соединений, полученных сваркой трением с перемешиванием // *Технология машиностроения*. 2018. № 8. С. 4–47.
7. Петров К.В., Муравьева О.В., Мышкин Ю.В., Башарова А.Ф. Моделирование магнитных, электрических и акустических полей проходного преобразователя для контроля цилиндрических объектов // *Дефектоскопия*. 2019. № 2. С. 16–24. <https://doi.org/10.1134/S0130308219020027>
8. Ren W., He J., Dixon S., Xu K. Enhancement of EMAT's efficiency by using silicon steel laminations back-plate // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2018. V. 274. P. 189–198. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.03.010>
9. Chiappa A., Iakovlev S., Marzani A., Giorgetti F., Groth C., Porziani S., Biancolini M.E. An analytical benchmark for a 2D problem of elastic wave propagation in a solid // *Engineering Structures*. 2021. V. 229. P. 111655. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111655>
10. Ремезов В.Б. Исследование эффективности возбуждения акустических колебаний в неферромагнитных материалах. Построение 3-D диаграмм для наглядного представления распространения акустических колебаний, возбуждаемых двухпроводным излучателем // *Дефектоскопия*. 2010. № 6. С. 50–59.
11. Лещенко Н.Г., Мужичкий В.Ф., Ремезов В.Б. Электромагнитно-акустический преобразователь. Патент RU31305U1. Бюл. 2003. № 21.
12. Mahmod M.F., Mukhtar M.F.H. Simulation analysis of ultrasonic testing in steel-based butt weld joint // *Research Progress in Mechanical and Manufacturing Engineering*. 2021. V. 2. N 1. P. 136–144.
13. Groth E.B., Clarke T.G.R., Schumacher da Silva G., Iturrioz I., Lacidogna G. The elastic wave propagation in rectangular waveguide structure: Determination of dispersion curves and their application in nondestructive techniques // *Applied Sciences*. 2020. V. 10. N 12. P. 4401. <https://doi.org/10.3390/app10124401>
14. Delrue S., Aleshin V., Bou Matar O., Van Den Abeele K. 2D modeling of elastic wave propagation in solids containing closed cracks [Электронный ресурс]. <https://www.comsol.ru/paper/2d-modeling-of-elastic-wave-propagation-in-solids-containing-closed-cracks-37571> (дата обращения: 11.03.2022).
15. Therrien C., Tummala M. *Probability and Random Processes for Electrical and Computer Engineers*. CRC Press, 2012. P. 287.
16. Андреев В.Г., Дмитриев К.В., Зотов Д.И., Крит Т.Б., Коробов А.И., Руденко О.В., Румянцева О.Д., Сапожников О.А., Хохлова В.А. *Нелинейные ультразвуковые волны в средах с поглощением и дисперсией: учебное пособие для физического практикума по акустике*. М: Физический факультет Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, 2017. 112 с.

References

1. Gogolinskiy K.V., Syasko V.A. From NDT to condition monitoring, development trends in digital economy. *NDT World*, 2020, vol. 23, no. 1, pp. 4–8. (in Russian). <https://doi.org/10.12737/1609-3178-2020-4-8>
2. Krautkrämer J., Krautkrämer H. *Ultrasonic Testing Of Materials*. Springer Science & Business Media, 2013.
3. Hirao M., Ogi H. *Electromagnetic Acoustic Transducers*. Springer, 2017. 380 p. <https://doi.org/10.1007/978-4-431-56036-4>
4. Rieger K., Erni D., Rueter D. Noncontact reception of ultrasound from soft magnetic mild steel with zero applied bias field EMATs. *NDT & E International*, 2022, vol. 125, pp. 102569. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2021.102569>
5. Varochko A.G., Kuznetsov S.V., Polovtcev V.A., Saratov N.N., Prokhorovich V.E., Bychenok V.A. History of formation and development potential of the friction stir welding technology in AO “Khrunichev State Research and Production Space Centre”. *Technology of Mechanical Engineering*, 2021, no. 4, pp. 16–41. (in Russian). <https://doi.org/10.34641/TM.2021.226.4.012>
6. Ashikhin D.S., Berkutov I.V., Stepanova K.A., Kotovshchikov I.O., Fedorov A.V., Svitnev I.V., Yakovlev Yu.O., Bychenok V.A. Quality ensuring of butt aluminum joints obtained by friction stir welding. *Technology of Mechanical Engineering*, 2018, no. 8, pp. 15–22. (in Russian)
7. Petrov K.V., Murav'eva O.V., Myshkin Y.V., Basharova A.F. Modeling magnetic, electric, and acoustic fields of a pass-through transducer when testing cylindrical objects. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2019, vol. 55, no. 2, pp. 102–110. <https://doi.org/10.1134/S1061830919020062>
8. Ren W., He J., Dixon S., Xu K. Enhancement of EMAT's efficiency by using silicon steel laminations back-plate. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2018, vol. 274, pp. 189–198. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.03.010>
9. Chiappa A., Iakovlev S., Marzani A., Giorgetti F., Groth C., Porziani S., Biancolini M.E. An analytical benchmark for a 2D problem of elastic wave propagation in a solid. *Engineering Structures*, 2021, vol. 229, pp. 111655. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111655>
10. Remezov V.B. Investigation of the efficiency of excitation of acoustic oscillations in nonferromagnetic materials. construction of 3D diagrams for pictorial representation of the propagation of acoustic oscillations excited by a double-wire radiator. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2010, vol. 46, no. 6, pp. 431–439. <https://doi.org/10.1134/S1061830910060070>
11. Leshchenko N.G., Muzhitchkii V.F., Remezov V.B. Electromagnetic acoustic transducer. *Patent RU31305U1*, 2003. (in Russian)
12. Mahmod M.F., Mukhtar M.F.H. Simulation analysis of ultrasonic testing in steel-based butt weld joint. *Research Progress in Mechanical and Manufacturing Engineering*, 2021, vol. 2, no. 1, pp. 136–144.
13. Groth E.B., Clarke T.G.R., da Silva G.S., Iturrioz I., Lacidogna G. The elastic wave propagation in rectangular waveguide structure: Determination of dispersion curves and their application in nondestructive techniques. *Applied Sciences*, 2020, vol. 10, no. 12, pp. 4401. <https://doi.org/10.3390/app10124401>
14. Delrue S., Aleshin V., Bou Matar O., Van Den Abeele K. *2D modeling of elastic wave propagation in solids containing closed cracks*. Available at: <https://www.comsol.ru/paper/2d-modeling-of-elastic-wave-propagation-in-solids-containing-closed-cracks-37571> (accessed: 11.03.2022).
15. Therrien C., Tummala M. *Probability and Random Processes for Electrical and Computer Engineers*. CRC Press, 2012, pp. 287.
16. Andreev V.G., Dmitriev K.V., Zotov D.I., Krit T.B., Korobov A.I., Rudenko O.V., Rumiantceva O.D., Sapozhnikov O.A., Khokhlova V.A. *Nonlinear Ultrasonic Waves in Absorbing and Dispersive Media*. Textbook for practical physics on acoustics. Moscow, Faculty of Physics M.V.Lomonosov Moscow State University, 2017, 112 p. (in Russian)

Авторы

Ашихин Денис Сергеевич — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация,  57190847400, <https://orcid.org/0000-0003-3549-113X>, ashikhinds@mail.ru

Федоров Алексей Владимирович — доктор технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация,  57219346304, <https://orcid.org/0000-0003-0612-922X>, avfedorov@itmo.ru

Authors

Denis S. Ashikhin — PhD student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation,  57190847400, <https://orcid.org/0000-0003-3549-113X>, ashikhinds@mail.ru

Alexey V. Fedorov — D. Sc., Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation,  57219346304, <https://orcid.org/0000-0003-0612-922X>, avfedorov@itmo.ru

Статья поступила в редакцию 29.09.2021

Одобрена после рецензирования 02.03.2022

Принята к печати 31.03.2022

Received 29.09.2021

Approved after reviewing 02.03.2022

Accepted 31.03.2022



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»