

Г.М. СУЧКОВ, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХП»;
О.М. ПЕТРИЩЕВ, д-р техн. наук, проф., НТУУ «КП»;
О.В. ДЕСЯТНІЧЕНКО, асп., НТУ «ХП»;
Н.М. ЮДАНОВА, ст. викладач, НТУ «ХП»

ЕМА ТОВЩИНОМЕРІЯ. (ОГЛЯД).

Виконано аналіз інформаційних джерел з методів, приладів, установок та систем товщинометрії виробів при використанні електромагнітно - акустичного способу збудження та прийому ультразвукових імпульсів. Визначені напрямки вдосконалення розглянутого виду контролю.

The analysis of information sources for methods, instruments and systems of thickness measuring for electromagnetic acoustic type of excitation and receiving has been executed. The basic directions for betterment of this control type have been designated.

Бурхливий розвиток методів і засобів неруйнівного контролю вимагає розробки нових методів і приладів неруйнівного контролю [1] і, в тому числі, товщини виробів. Переважно це прилади, що реалізують метод ультразвукового контролю з використанням контактної рідини. У той же час були визначені області [3], у яких застосування контактних методів контролю недостатньо ефективно. Це контроль виробів з забрудненої поверхні без спеціальної зачистки, дефектоскопія гарячих і холодних виробів, високопродуктивний контроль, товщинометрія з низькими експлуатаційними витратами і т.д. Тому в останні роки спостерігається інтенсифікація досліджень і розробок у напрямі створення засобів визначення товщини виробів безконтактним способом. Найбільші технічні успіхи у зазначеному напрямку досягнуті за рахунок застосування електромагнітних - акустичного (ЕМА) способу збудження і прийому ультразвукових коливань [1-26].

Можливості ЕМА способу ультразвукової товщинометрії. Можливості електромагнітні - акустичного способу збудження і прийому ультразвукових (УЗ) коливань (УЗК) найбільш перспективні стосовно товщинометрії [1]. У цьому напрямі ведуться інтенсивні дослідження і апаратні розробки [2-26]. Автори роботи [2] провели об'ємні дослідження з товщинометрії феромагнітних труб імпульсним ЕМА способом і створили зразок товщиноміру. Необхідна для збудження і прийому УЗК магнітне поле створюється імпульсним електромагнітом. Вимірювання товщини виробів здійснюється імпульсами зсувних УЗК, що, за інших рівних умов, дозволяє контролювати менші товщини. Обробка сигналу при вимірюванні здійснюється двома методами - з вимірюванням часового інтервалу між зондуючими імпульсом і будь-яким донним імпульсом або за часовим інтервалом між будь-якою парою донних сигналів. Вимірювання інтервалу між донними імпульсами особливо перспективно для ЕМА способу

товщинометрії, так як при цьому виключаються традиційні похибки, а також похибки, обумовлені об'ємним розподілом електромагнітно - динамічних сил у поверхневому шарі об'єкта контролю (ОК) при збудженні і прийомі УЗК. Найбільш доцільне застосування такого режиму при товщинометрії тонких виробів з ферромагнітних металів з низькою електропровідністю, тому що похибки можуть збільшитися до істотних величин. Крім того, зменшується «мертва зона». Однак такий спосіб не може застосовуватися для контролю матеріалу ОК з високим загасанням УЗК або виробів з кородованими поверхнями. При дослідженнях автори [2] встановили, що крім корисного відлуння сигналів, що несуть інформацію про товщину виробу, спостерігаються імпульси завад, обумовлені тим, що перетворювач збуджує як зсувні (корисні), так і подовжні УЗ коливання, що трансформуються при прийомі у зсувні. Отже, необхідно застосовувати заходи для усунення впливу когерентних перешкод. Автори [2] також встановили, що в процесі контролю, внаслідок змін величини зазору між ЕМАП і поверхнею виробу, впливу якості контрольованої поверхні і т. п., загальний рівень сигналу на виході перетворювача може змінюватися в п'ять і більше разів. Тому необхідно застосовувати засоби боротьби з впливом вказаних факторів. Автори стверджують, що при оптимальних параметрах (напруга, струм) зондуючого імпульсу і імпульсу підмагнічування, за допомогою товщиномірів можуть контролюватися ферромагнітні труби з товщиною стінки 3-50 мм з точністю 2%. У той же час згадані оптимальні параметри автори не вказали.

Характеристики макета товщиноміру, в якому застосовується ЕМА метод контролю з використанням частотно - модульованих УЗ і електромагнітних хвиль, описані в роботі [3]. Товщина тонкостінного металевого виробу на ділянках з плоскими поверхнями вимірюється за рахунок резонансу пружних коливань. Похибка вимірювання цим приладом не перевищує $\pm 1,4\%$. Проте, в даний час резонансний метод застосовують рідко і лише для надтонких виробів з плоскими поверхнями.

У роботах [4-6] виконано значний обсяг досліджень з товщинометрії ОК нагрітих до високих температур - область, в якій практично неможливо застосовувати традиційні контактні товщиноміри. Встановлено особливості вимірювань товщини ферромагнітних виробів нагрітих до температури точки Кюрі і вище. Обґрунтовано висновок про необхідність виконання товщинометрії гарячих ОК поздовжніми ультразвуковими хвилями. Розроблено засоби для вимірювань товщини стінок труб. Наприклад, прилад [4] вимірює товщину стінки труби в діапазоні 1,5-30 мм з точністю 1%. Для забезпечення заданої чутливості автори пропонують підвищувати амплітуду зондуючих імпульсів.

Дані про малогабаритні пристрої для ЕМА товщиномірів наведені в роботах [7, 9]. У НДІ електронної інтроскопії [7] у вигляді модуля розроблена компактна аналогова частина товщиноміру. Електромагнітно - акустичний перетворювач, генератор ударного збудження і широкосмуговий попередній

підсилювач конструктивно об'єднані в одному корпусі діаметром 30 мм і висотою 54 мм. Модуль з'єднується з приладом кабелем, по якому передаються потенціали від джерел живлення (+700 В, +5 В), синхроімпульси для запуску генератора і вихідний сигнал (прийняті відбиті імпульси). Генератор забезпечує пропускання через провідники котушки індуктора ЕМА перетворювача імпульсів струму 80 А з частотою зондування до 1 кГц. ЕМАП містить високочастотну котушку з 12 витків дроту ПЕВ діаметром 0,31 мм, яка збуджується імпульсом тривалістю 0,3 мкс і амплітудою 500 В. Час перехідного процесу, пов'язаний з насиченням підсилювача, становить близько 3 мкс. З наведених авторами даних випливає, що при таких значних імпульсних потужностях співвідношення сигнал/шум при нульовому зазорі між ЕМАП і поверхнею алюмінієвого зразка становить 6 разів, а «мертва» зона перевищує 9 мм. Отримані в цьому пристрої технологічні характеристики імпульсів збудження узгоджуються з рекомендаціями роботи [8], де стверджується, що через низьку ефективність ЕМА перетворення для нормальної роботи ЕМАП струм у його індукторі повинен досягати 100 А і більше, а індукція поляризуючого магнітного поля - 1 ... 5 Тл, що мало ймовірно навіть для сучасного розвитку техніки. Окрім того, сканувати феромагнітний виріб ЕМАП з таким магнітом буде практично неможливо.

Ще більш потужний зразок пристрою УВТ-03 для товщинометрії створений авторами роботи [9]. Його генератор ударного збудження живиться напругою 1 кВ. Повідомляється, що ЕМА перетворювач забезпечує роздільну здатність вимірювання товщини матеріалу - близько 0,1 мм по алюмінію. Похибка вимірювань становить 2%. Максимально допустимий зазор між ЕМАП і металом 0,5 мм. Як показує аналіз даних цієї роботи, підвищення потужності генератора товщиноміру УВТ-03, у порівнянні з роботою [7], помітного виграшу не дало.

У НДІ [10] розроблено автоматичний ЕМА товщиномір УТ-40Б, призначений для контролю металевих листів завтовшки 0,5 ... 6 мм. Проектна продуктивність контролю 2600 км² в рік, похибка вимірювання не більше 2%. Там же розроблений УЗ автоматичний чотирьохканальний товщиномір УТ-80Б [11], призначений для контролю сталевих феромагнітних труб діаметром 30-150 мм з товщиною стінок 3 ... 15 мм. Зондуючий імпульс являє собою напівхвилю синусоїди тривалістю $0,25 \pm 0,05$ мкс з амплітудою струму 50 ± 10 А. Частота зондування - 1000 Гц. Швидкість контролю - до 3 м/с. Межа основної похибки - $\pm 2\%$. У результаті дослідної експлуатації електромагнітної - акустичного товщиноміру УТ-80Б встановлено ряд важливих результатів з яких випливає, що основну погрішність у вимірювання товщини вносить традиційний спосіб вимірювання проміжків часу між донними імпульсами, характеристики яких змінюються в процесі контролю. Нестабільність положення ЕМАП відносно поверхні труби практично не впливає на спрямованість випромінювання зсувних УЗК. Не потрібна настройка ЕМА товщиноміру на кожен тип досліджених сталей в

діапазоні ст.10 ... ст.45. Мінімальний діаметр контрольованої труби склав 18 мм. У той же час встановлено наявність додаткових заважаючих імпульсів, обумовлених прийомом імпульсів поздовжніх хвиль у проміжку між інформаційними донними сигналами. Виявлена значна неоднорідність пружних властивостей гарячекатаних труб. Визначено, що з-за неоднорідності металу стінок труби, коливань зазору між ЕМАП і ОК, кривизни труби, наявності на поверхні дефектів, окалини, а також задирок на торцях амплітуда донних імпульсів може ставати занадто малою або спотворюється. У результаті близько 26% вимірювань від загального обсягу не виконувалися. Отримані в цій роботі важливі висновки говорять про необхідність виконання подальших досліджень електроакустичного тракту, а також перегляду принципів побудови ЕМА товщиномірів.

Дані про сучасні розробки, які спрямовані на створення ЕМА товщиномірів, наведені в роботах [12-26]. У роботі [18] було показано перевагу застосування при товщинометрії радіоімпульсів. Таке ж технологічне рішення використано в дефектоскопі - товщиномірі [17], в якому, на відміну від раніше застосованого ударного збудження ЕМАП [2, 7-10], живлення ЕМА перетворювачів здійснено радіоімпульсами струму тривалістю 1 ... 3 періоди частоти заповнення 1 ... 3 МГц. Імпульсна потужність генератора товщиноміру [17] дорівнює 25 кВт, частота збудження зондуючих імпульсів - до 5 кГц. У повідомленні автори не вказали, які мінімальні товщини можна вимірювати при використанні довготривалих зондуючих імпульсів. Судячи з наведених характеристик, цей прилад може використовуватися тільки в стаціонарних умовах для контролю достатньо товстих виробів.

В інституті ІЕЗ ім. Є.О. Патона [12] виконані дослідження та розробка ЕМА товщиноміру для космічної техніки. Встановлено, що ЕМАП, збуджують і приймають зсувні хвилі під кутом 0° . Вони ефективні для вимірювання товщини виробів з алюмінію і сталі. Похибка вимірювання товщини в діапазоні 2,5 ... 200 мм не перевищувала $\pm 0,25$ мм, а похибка вимірювання товщини зразка з покриттям величиною 0,1 - 0,3 мм склала $\pm 0,5$ мм. Встановлено, що більш низька точність вимірювання товщини має місце при наявності на ОК покриттів. Очевидно, збільшення похибки пов'язано з еквівалентним збільшенням зазору між ЕМАП і металом. Тому слід розробляти прилади, які можуть виконувати контроль при значних зазорах між ЕМАП і поверхнею виробу.

В об'єднанні ЗАТ «НДІ МНВО «СПЕКТР» розроблений портативний ЕМА товщиномір [19, 24], який за габаритами і вагою не набагато перевищує аналогічні контактні пристрої. Як стверджують автори, відмітною особливістю цього приладу є можливість роботи на виробках з сильно кородованою, нерівною і необробленою поверхнею. Товщиномір ЕМАТ-100 обладнаний мікропроцесором, що дозволяє забезпечити стабільну роботу всіх систем приладу. Межа допустимої основної абсолютної похибки становить

$\pm (0,1+0,001xH)$ мм, де H – товщина виробу). Пристрій може працювати через шар фарби або захисне покриття товщиною до 1,5 мм. У той же час у статті йдеться про відхилення вимірної товщини від дійсної на 0,2 мм, а в одній точці навіть на 2,5 мм. Можливо, сильне відхилення товщини від дійсної обумовлено не тільки наявністю внутрішнього дефекту, а, як і в роботі [11], визначається спотвореннями інформаційного сигналу із-за неоднорідностей пружних властивостей контролюваного об'єкту металу.

Товщиномір ЕМАТ-1 [21] складається з електронного блоку, зібраного в корпусі товщиноміру УТ-93П і ЕМА перетворювача зсувних хвиль. За даними авторів, принципова відмінність товщиноміру ЕМАТ-1 від товщиноміру УВТ-03 [9] - здатність контролювати не тільки сплави алюмінію, але й магнітні марки сталі, що істотно розширює область його застосування.

Подальше кроки щодо вдосконалення ЕМА товщиномірів зроблені в роботах [13 - 17, 19-20, 22, 24-26]. Товщиноміри «КРМ-Ц-Дельта» [14, 22, 24] забезпечений графічним рідкокристалічним індикатором. Зображення на екрані використовується для точного встановлення вимірювальних курсорів в заданих місцях яку вказують реалізації. Оцінка товщини виробу проводиться за традиційною технологією - шляхом вимірювання тривалості часових інтервалів між зондуючим і одним з донних імпульсів, або між двома обраними донними імпульсами. Таким чином, ускладнивши конструкцію приладу, автори істотно збільшили вірогідність правильного вимірювання товщини. Крім того, при недостатній величині донних сигналів застосовується накопичення амплітуд сигналів від 2 до 20 зондуючих посилок. Автори декларують, що основна абсолютна похибка, оцінена в спеціальних умовах, в діапазоні товщин 2,5 ... 20 мм не перевищує 0,06 мм. У цьому приладі застосовується ударне збудження ЕМАП при частоті слідування зондуючих імпульсів 1 Гц.

Аналіз розглянутих відомих досліджень і розробок приводить до висновку, що подальше вдосконалення ЕМА товщиноміром можливо за рахунок застосування нових технологій товщинометрії. Сучасні мікропроцесори і елементна база дозволяють здійснити найскладніші алгоритми функціонування ЕМА товщиноміра. Основу технології товщинометрії становить процедура визначення товщини ОК. Одним з ефективних математичних апаратів, який може кардинально змінити процес товщинометрії, є кореляційний. Перевагу застосування кореляційного аналізу в ЕМА товщиномірі було доведено в роботі [27]. Подальший розвиток особливостей застосування та ефективності методу кореляційного аналізу в ЕМА приладах виконано в роботі [28]. Вперше практична реалізація кореляційного аналізу була здійснена при розробці та впровадженні апаратури 4-х каналного автоматичного ЕМА товщиноміру [25 26] на ЗАТ «Ніко Тьюб» (м. Нікополь). Впроваджений 20.07.2001 р. прилад забезпечує на швидкості до 1 м/с вимір товщини стінок труб в діапазоні 3 ... 12 мм уздовж

4-х утворюючих по всій довжині, виключаючи кінцеві ділянки розміром 5 ... 10 мм. Діаметр контрольованих труб одним і там же ЕМАП – 42 ... 115 мм. Апаратура установки має більш широкі можливості. Вона дозволяє виконувати контроль труб товщиною від 0, 6 мм, діаметром більше 12 мм. Точність вимірювання товщини - $\pm 0,1$ мм. При виконанні впроваджувальних робіт на ЗАТ «Ніко Тьюб» було встановлено, що метал суцільнотягнутих труб має локальні неоднорідності, витягнуті уздовж твірної труби. Результат збігається з даними роботи [11]. Тобто цей чинник є загальним для різних технологій виробництва труб. Його вплив призводив до істотних коливань часу поширення УЗК в різних ділянках металу під робочою зоною ЕМАП шириною 5 мм. Помилка вимірювань була значною, якщо використовувався традиційний метод вимірювання проміжків часу між зондуємим імпульсом або між заданими донними імпульсами, а іноді вимірювання товщини неможливо було виконати. Завдання вимірювання товщини суцільнотягнутих труб була вирішена лише після застосування апарату автокореляційного аналізу.

В роботі [29] також було підтверджено перевагу кореляційної обробки інформації при ЕМА товщинометрії. На підставі робіт [25-27, 29] в об'єднанні ЗАТ «НДІ МНВО «СПЕКТР» ТОВ «Акустичні контрольні системи» розроблений ЕМА товщиномір А1270 для контролю прокату з алюмінієвих сплавів [13, 20]. Для досліджень можливостей застосування в товщиномірах кореляційної обробки була використана лабораторна установка з цифровим осцилографом і персональним комп'ютером [20]. Так само як і в пристроях за даними робіт [16, 22, 24] прилад забезпечений рідкокристалічним екраном для візуалізації прийнятої реалізації. Такий підхід дозволяє помітно підвищити надійність виконання правильних вимірювань.

Автори робіт [15, 23] пішли по шляху вдосконалення характеристик ЕМА товщиномірів шляхом застосування ультразвукових сигналів у вигляді коду Баркера або спеціальних послідовностей. У такому разі прийняті сигнали необхідно також обробляти кореляційним методом, наприклад з використанням оптимального фільтра. У результаті корисний сигнал краще виділитися на фоні шуму і завад. Слід зазначити, що реалізація спеціальних сигналів при ЕМА товщинометрії можлива при широкосмуговому генераторі зондуємих імпульсів (ГЗІ), ЕМАП та попередньому підсилювачі. Це є суттєвим недоліком, так як навіть при ударному збудженні ультразвукових імпульсів завдання побудови аналогової частини ЕМА товщиноміру вимагає участі великої групи висококваліфікованих інженерів різних спеціальностей.

В останній час вчені багатьох країн світу приділяють увагу теоретичним, модельним та експериментальним дослідженням акустичного тракту електромагнітно - акустичних перетворювачів [30-34]. Автори цих робіт розглянули вплив різних факторів на перетворення електромагнітної енергії в акустичну, а також в зворотному напрямку. Розглянуті питання з розрахунку зміщень в акустичному полі в залежності від провідності металів, частотні

залежності, вплив скін-ефекту. Показано, що при використанні тангенціального магнітного поля основний вклад в ЕМА перетворення дає магнітострикційний механізм. Стверджується, що магнітний механізм перетворення має місце при контролі матеріалів з незначною електропровідністю. Проте в цих роботах та аналогічних роботах інших авторів недостатньо досліджено акустичний тракт з урахуванням використання пакетних імпульсів з заданою частотою заповнення та заданою тривалістю пакету.

Особливо важливі результати стосовно побудови електромагнітно-акустичних перетворювачів отримані в роботі [31, 35]. Отримані моделі та їх використання дозволяє побудувати конструкції ЕМАП, виходячи з інформації відносно характеристик матеріалів, які будуть контролюватися цими перетворювачами. В роботі [35] встановлено, що форма і розміри контуру ЕМАП та довжина пружної хвилі однозначно пов'язані між собою. Цей зв'язок обумовлений інтегруючими властивостями перетворювача. Авторами показана необхідність обов'язкового врахування частотного діапазону та різновиду ультразвукової хвилі. Надано рекомендації щодо вибору форми і розміру індуктора конкретного ЕМАП.

Аналіз відомих робіт [1-39] показав, що основною причиною, яка стримує розробку ефективних ЕМА товщиномірів є традиційний підхід до їх побудови. Найбільшою мірою це стосується портативних приладів, так як багато вдалих технологічних та технічних рішень, отриманих при розробці автоматичних установок [2, 11, 25-26], часто використати неможливо. З огляду на тенденції щодо розвитку ЕМА товщиномірів [15,17-18, 20, 23, 25-29] були сформульовані основні принципи побудови таких приладів [37]. Їх основна суть полягає в наступному. Технологічний процес товщинометрії, реалізований при конструюванні ЕМА приладів, повинен складатися з трьох основних етапів. Перший етап - формування оптимізованого початкового сигналу з заданими параметрами - тривалістю, частотою і функцією її зміни, фазою і функцією її зміни, амплітудою і функцією її зміни. Цей етап виконується з використанням мікропроцесора, а потім сформований сигнал підсилюється потужним смуговим підсилювачем - ГЗІ. Другий етап - збудження і прийом оптимального сигналу. Цей етап здійснюється ЕМАП із смугою пропускання, близької до смуги інформаційного сигналу. Третій етап - оптимальна обробка інформаційної реалізації з урахуванням відомих характеристик вихідного імпульсу (у вигляді реалізації заданої тривалості). Цей етап повинен виконуватися спеціальним і оптимальним фільтрами. Вони можуть бути здійснені аналоговим або (і) цифровим пристроєм, або корелятором.

Для перевірки розроблених принципів був спроектований і виготовлений «ручний» ЕМА товщиномір, в якому були враховані економічні та конструктивні особливості, а також реалізовані наступні основні положення. Оригінальний інформаційний сигнал формується мікропроцесором у вигляді

радіосигналу тривалістю від 1 до 7 періодів із частотою, величину якої можна регулювати в інтервалі 1,8 ... 8 МГц. Потім корисний сигнал підсилюється смуговим ГЗІ. Імпульсна потужність живлення широкосмугового ЕМАП знижена до 2 ... 3 кВт, що майже на порядок менше, ніж, наприклад, в приладі [17]. Такий підхід дозволяє зменшити «мертву» зону, захистити вхід попереднього підсилювача від впливу наведеного зонduючого імпульсу і, отже, контролювати менші товщини. Товщиномір не втрачає працездатності при зменшенні імпульсної потужності ГЗІ до 600 Вт. ГЗІ товщиноміру живиться від батарей (акумуляторів) типу «Крона», а решта електронної частини - від пальчикових батарей (акумуляторів). Частота проходження зонduючих імпульсів сформованих ГЗІ може досягати 50 кГц, проте обмежена 100 Гц - в цілях економії енергії батарей. Час безперервної роботи пальчикових батарей – 20 годин, батарей типу «Крона» - більше 3 місяців. Джерело поляризуючого магнітного поля (ДПМП) [37] виконаний зі сплаву на основі елементів Nd Fe B. ЕМА перетворювач містить роздільно-суміщений плоский індуктор з двома одношаровими котушками індуктивності, що містять по 18 витків дроту ПЕТВ-0, 12 мм, віднесених один від одного на 1 мм. ЕМАП містить пристрої для запобігання від збудження в її елементах когерентних перешкод при проходженні зонduючого імпульсу, а також протектор із зносостійкого матеріалу завтовшки 0,7 мм. Корпус ЕМАП виконаний з алюмінієвого сплаву, що дозволяє екранувати перетворювач від впливу електромагнітних завад. У корпусі ЕМАП розташовані схема захисту підсилювача від впливу наведення зонduючого імпульсу і регульований попередній підсилювач з коефіцієнтом підсилення до 60 дБ. ЕМАП з'єднується з електронним блоком товщиноміру екранованим багатожильним кабелем. В електронному блоці реалізація заданої довжини оцифровується, обробляється вейвлет-фільтром і піддається крос - кореляційному аналізу з допомогою другого мікропроцесора. Переваги такої технології обробки інформації полягає у виключенні операцій постійної регулювання посилення і стабілізації величини амплітуди інформаційних сигналів, які раніше були обов'язковими навіть для сучасних ЕМА товщиномірів [24]. На результати вимірювань не впливають спотворення форми сигналу [8, 24], величини амплітуд напівхвиль в інформаційному сигналі і їх співвідношення. Вимірювання можуть виконуватися в складних умовах, коли амплітуда донних імпульсів менше рівня шумів на 20 ... 40 дБ. З виходу другого мікропроцесора цифрова інформація надходить на яскравий напівпровідниковий індикатор червоного кольору. Цифри індикатора добре видно як при сонячному освітленні, так і при слабкому освітленні або його відсутності. На підставі результатів відомих робіт, а також виходячи з призначення ЕМА товщиномірів контролювати ОК з кородованою, грубою або забрудненою поверхнею, дискретність індикації товщини обрана рівний 0,1 мм. Оскільки всі операції підготовки та проведення вимірювань покладені на два мікропроцесора, то прилад дуже простий в управлінні. Виконання

вимірювань відбувається автоматично після натискання кнопки «Пуск». Калібрування товщиноміри на зразку з відомою товщиною проводиться за допомогою трьох кнопок: «Калібрування», при цьому загоряється індикаторний світлодіод, і кнопки «+» і «-». Крім згаданих кнопок і вмикача інших регуляторів не передбачено. (Частота і тривалість зондуючих імпульсів встановлюється регуляторами, розміщеними на внутрішніх електронних платах).

Дослідженнями роботи товщиноміру встановлено, що він працездатний при зазорах між протектором ЕМАП і металом до 3 мм. Цей висновок підтверджується виконаними 100-кратними вимірами на зразку, виготовленим зі сталі У8 товщиною 15,6 мм при частоті УЗК 3 МГц і тривалості вихідного імпульсу, рівній трьом періодам заповнення частоти ультразвукових коливань. Дані про ймовірність правильного вимірювання товщини ОК наведені в таблиці.

Тимчасова стабільність роботи нового товщиноміри виявилася високою. Його випробування на одній ділянці зразка показали, що показання приладу протягом 8 годин не змінилися.

Таблиця 1

Залежність ймовірності правильного вимірювання товщини ОК від величини зазору між протектором ЕМАП і металом зразка

Зазор між протектором ЕМАП і ОК, мм	0,2	1	2	2,5	3	3,5
Вірогідність правильного вимірювання, %	100	100	100	100	98	62

При вимірах товщин ОК з різних матеріалів (сталі ст.3, ст.45, У7 і У8, алюміній, 09Г2С, 12ХМ, трубні сталі виробництва ЗАТ «Ніко Тьюб», сталі обсадних труб нафтового сортаменту і аналогічні) в діапазоні товщин 3 ... 27 мм встановлено, що калібрування приладу на кожен тип матеріалу не потрібно, тому що основна абсолютна похибка не перевищує $\pm 0,1$ мм. Очевидно, що для ніші в області товщинометрії, займаної ЕМА приладами (кородовані поверхні, груба обробка, катана поверхня із забрудненнями і т.д.), встановлювати більшу точність і меншу похибку не має сенсу.

На результати вимірювань розробленим приладом в значно меншій мірі впливають неоднорідності часу поширення УЗК в металі під робочою зоною ЕМАП, а також когерентні додаткові завадові імпульси поздовжніх [2, 11] і трансформованих [38] хвиль.

Встановлено, що, на відміну від [11], наявність на поверхні ОК в активній зоні ЕМАП скріпленої з поверхнею окалини при нормальній температурі, збільшує співвідношення корисний сигнал/шум. Шар скріпленої окалини товщиною більше 0,5 мм може збільшувати корисний сигнал до

90 дБ. Чим більше товщина окалини, тим більше амплітуда донних сигналів (у вказаному діапазоні). Ступінь збільшення сигналу залежить також від складу окалини, її температури, технології виробництва металу, впливу на неї навколишнього середовища. Ефект збільшення окалиною амплітуди сигналів можна пояснити переважаючим впливом магнітострикційних механізму збудження і прийому УЗК [39]. При традиційному вимірі товщини наявність не скріплених з поверхнею ОК частинок окалини призводить до зменшення співвідношення амплітуд донний сигнал/шум і до появи перешкод, амплітуда яких експоненціально зменшується з моменту завершення зондування імпульсу. При використанні кореляційної обробки наявність відшарованої окалини в зазорі між ЕМАП і металом на похибку вимірювань товщини практично не впливає.

Слід зазначити, що наявність поверхневих дефектів слабо впливає на результати вимірювань навіть при значному їхньому розвитку (за умови, що вони не перекривають акустичне поле). Наявність внутрішніх дефектів помітно позначається на результатах вимірювань у випадку, якщо вони є суттєвою перешкодою для поширення імпульсів пружних зсувних коливань, наприклад, розшарування, тріщини, закати і т.д. Оцінка впливу кривизни поверхні ОК на результати товщинометрії показала таке. Якщо загальне значення відстані між ЕМАП і металом, обумовлене локальною кривизною і товщиною покриття перевищує 3 мм, то кривизна позначається на точності і стабільності вимірювань. Якщо менше - то ні.

Дослідженнями встановлено, що одним і тим же ЕМА перетворювачем описаної конструкції вдається вимірювати товщину труб зовнішнім діаметром 6 мм і більше. При цьому технологічний зазор по найближчій відстані не повинен перевищувати 0,2 мм. При виготовленні ЕМАП з криволінійною поверхнею робочого торця обмежень по кривизні ОК не виникає.

Висновки

1. Встановлена (теоретичними, експериментальними та модельними дослідженнями) доцільність вдосконалення акустичного тракту електромагнітно-акустичного товщиноміру з ЕМА перетворювачем, який формує заданий кут введення акустичного поля, з врахуванням збудження і прийому акустичних імпульсів у вигляді пакету з різною часовою тривалістю та заповненням з заданою частотою.

2. Визначено, що одним з напрямків підвищення ефективності контролю товщини виробів «ручним» ЕМА товщиноміром являється збільшення потужності генератора зондуємих імпульсів за рахунок створення конструкцій нового типу та використання сучасних підсилюючих радіоелементів.

3. Встановлена необхідність дослідження впливу характеристик ЕМАП та ЕМА товщиноміру, властивостей контролюваного матеріалу виробів, стану його поверхні і геометричної форми та інших факторів, які визначають

похибку вимірювання товщини

4. Визначена необхідність розробки нових методів обробки реалізацій, отриманих від ЕМАП, які б дали можливість, на відміну від кореляційних та аналогічних методів, суттєво підвищити продуктивність контролю товщини.

5. Встановлено, що форма і розміри контуру ЕМАП та довжина пружної хвилі однозначно пов'язані між собою. Цей зв'язок обумовлений інтегруючими властивостями перетворювача. Показана необхідність обов'язкового врахування частотного діапазону та різновиду ультразвукової хвилі. Розроблені рекомендації щодо вибору форми і розміру індуктора конкретного ЕМАП.

6. Аналіз потреби ринку неруйнівного контролю в товщиномірах та стан їх поставок показує, що ЕМА товщиноміри нового різновиду можуть доповнити існуючу гаму приладів для ультразвукового контролю товщини.

Список літератури: 1. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т.3: Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с. 2. Бутенко А. И., Малинка А. В., Стефаров В. И. и др. Толщинометрия труб импульсным электромагнитно – акустическим методом // Дефектоскопия. 1973. № 3. С. 7 - 11. 3. Фицморов С.А. Бесконтактный контроль толщины с помощью ультразвуковых и электромагнитных волн // Дефектоскопия. 1976. № 5. С. 29 – 33. 4. Буденков Г.А., Бедов С.Н., Волегов Ю.В. и др. Цифровой ультразвуковой толщиномер ТЭМАЦ-1. – Информационный листок № 482-74. Челябинск: 1974. – 4 с. 5. Себко В.П., Сучков Г.М., Ищенко В.Н. Исследование факторов, влияющих на результаты контроля горячего металла ЭМА способом // Дефектоскопия. - 2004. - № 11. - С. 40-49. 6. Гуревич С.Ю. Основы теории и практического применения высокотемпературного ультразвукового контроля ферромагнитных металлоизделий. – Дис. на соиск. уч. степ. докт. техн. наук, Екатеринбург: ИФМ УрО РАН. 1995. – 416 с. 7. Жуков В.К., Ольшевский В.П. Электромагнитно – акустический преобразовательный модуль // Дефектоскопия. 1985. № 12. С. 74 – 76. 8. Гусев Е. А., Королев М. В., Карпельсон А. Е. и др. Приборы неразрушающего контроля толщины в машиностроении. – М.: Машиностроение. 1993. - 144 с. 9. Герасенов Н.Ю., Ольшевский В.П. Портативный ЭМА толщиномер УВТ-03 // Дефектоскопия. 1990. № 6. С. 80 – 82. 10. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: Справочник: в 2 т. под ред. В.В. Клюева. Т. 2. М.: Машиностроение, 1976. –327 с. 11. Клюев В.В., Шубаев С.Н., Мужичкий В.Ф. Опыт эксплуатации электромагнитно – акустического толщиномера УТ-80Б // Дефектоскопия. 1982. №9. С. 37-43. 12. Радько В.П. Преобразователи и приборы для неразрушающего контроля электромагнитно – акустическим методом. Результаты экспериментальных исследований // Бюллетень УТ НКТД. № 1. 2002. С. 14-21. 13. Самокрутов А.А. и др. ЭМА толщиномер для авиакосмической промышленности. 16-я российская научно-техническая конференция «неразрушающий контроль и диагностика». Труды конференции. Санкт-Петербург, 9-12 сентября, 2002 г., доклад 4.5.38. 14. Клюев В.В., Мужичкий В.Ф., Безлюдько Г.Я. и др. Бесконтактный ультразвуковой толщиномер для измерения толщины стенки насосно – компрессорных труб // Контроль. Диагностика. 2002. № 4. С. 43-44. 15. Карнаш О.М., Криничный П.Я., Виськов О.В. ЕМА – товщиномір з підвищеною чутливістю. - 3б. наукових праць “Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів”. Вип. 6 – “ЛЕОТЕСТ-2001”. Київ-Львів. 2001. С. 38-41. 16. Универсальный ультразвуковой толщиномер 37 DL PLUS Реклама фирмы GE Panametrics // В мире неразрушающего контроля. 2003. № 3 (21). С. 37. 17. Неволин О.В., Иванов А.И., Астафьев А.Н. и др. Электромагнитно – акустический дефектоскоп – толщиномер. – В кн. «Информационные материалы ежегодного семинара-выставки «Современные технологии и приборы неразрушающего контроля и технической диагностики». Харьков: 20-21 ноября 2003 г. С. 13 – 15. 18. Себко В. П., Сучков Г.М., Алексеев Е.

А. Оптимизация параметров ЭМА толщиномеров для контроля тонкостенных изделий. - Дефектоскопия. 2002. № 12. С. 21 - 28. **19. Бердников В.М., Лещенко Н.Г., Мужичкий В.Ф.**, и др. Опыт опробования электромагнитно – акустических толщиномеров типа ЭМАТ-100 на предприятиях МПС и в нефтегазовой промышленности // Дефектоскопия. 2004. № 1. С. 20 – 24. **20. Самокрутов А.А., Бобров В.Т., Шевалдыкин В.Г.** и др. Применение ЭМА толщиномер А1270 для контроля проката из алюминиевых сплавов // В мире разрушающего контроля. 2002. № 4 (18). С. 24 – 28. **21. Лещенко Н.Г., Шановалов П.Ф.** Малогабаритный ЭМА толщиномер ЭМАТ-1 // Дефектоскопия. 1993. № 10. С. 95 – 96. **22. Безлюдько Г.Я., Долбня Е.В., Мужичкий В.Ф.** и др. Портативный бесконтактный ЭМА – толщиномер // Дефектоскопия. 2004. № 1. С. 46 – 53. **23. Вісков О.В.** Підвищення вірогідності та інформативності акустичного контролю трубних виробів. Автореф. канд. дис. Івано-Франківськ: Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. 2003. – 20 с. **24. Безлюдько Г.Я., Долбня Е.В., Лещенко Н.Г.** и др. Портативные электромагнитноакустические толщиномеры (ЭМАТ) // Дефектоскопия. 2004. № 4. С. 28 - 35. **25. Сучков Г.М.** Разработка технологии и аппаратуры для ЭМА толщиномер // Контроль. Диагностика. № 11. 2001. С. 38-39. **26. Вагрюв Д. М., Сучков Г.М., Виноградов В. В.** и др. Создание электромагнитно – акустического толщиномер для контроля тонкостенных труб // Дефектоскопия. 2002. № 10. С. 7-13. **27. Сучков Г. М.** Обработка информации. Возможности корреляционного анализа при толщинотрии ЭМА методом // Контроль. Диагностика. 2002. № 8. С.37 - 40. **28. Сучков Г.М.** Обработка информации. Повышение возможностей корреляционного анализа в ЭМА приборах // Контроль. Диагностика. - 2004. - № 12. - С. 13-16. **29. Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г.** Применение корреляционных методов обработки сигналов импульсных ультразвуковых толщиномеров. 16-я российская научно-техническая конференция «неразрушающий контроль и диагностика». Труды конференции. Санкт-Петербург, 9-12 сентября, 2002 г., доклад 2.01. **30. Palmer S.B.** Industrially viablenon-contact ultrasound. Insight. 2003. V.45. N.3. P.211-217. **31. Петрищев О.Н.** Математическое моделирование преобразователей электромагнитного типа в режиме приема ультразвуковых волн в металлах. – Акустичний вісник. 2005. Т.8. №3. С. 50-59. **32. Мужичкий В.Ф., Ремезав В.Б., Комаров В.А.** К основам ЭМА толщинотрии с помощью накладных преобразователей. Обратное и двойное ЭМАП в нормальном поляризуемом поле. Дефектоскопия. 2007. № 1. С. 64-79. **33. Мужичкий В.Ф., Ремезав В.Б., Комаров В.А.** К основам ЭМА толщинотрии с помощью накладных преобразователей. Обратное и двойное ЭМАП в тангенциальном поляризуемом поле. Дефектоскопия. 2007. № 2. С. 35-52. **34. Комаров В.А., Мужичкий В.Ф., Гуревич С.Ю.** Теория физических полей. Т.111. Связанные поля. – Челябинск-Ижевск: ЮУрГУ, 2000, - 627 с. **35. Петрищев О.Н., Сучков Г.М.** Теоретические концепции создания преобразователей электромагнитного типа. Режим возбуждения // Вестник НТУ «ХПИ» – 2009. – Вып. 14. – С. 34 – 44. **36. Сучков Г.М.** Построение приборов для ультразвукового контроля и измерений с использованием ЭМА способа возбуждения и приема упругих импульсов // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. - 2005. - № 2 - С. 36-39. **37. Козен-Далин В.В., Комаров В.Е.** Расчет и испытание систем с постоянными магнитами. – М.: Энергия, 1977. – 248 с. **38. Сучков Г.М.** Исследование особенностей распространения упругих волн, возбужденных ЭМА способом. - Контроль. Диагностика. 2001. №12 . С.36-39. **39. Сучков Г.М.** Исследования ЭМА способом выявляемости плоскодонных отражателей в образцах из различных материалов // Контроль. Диагностика. 2002. № 5. С. 50-51.