

УДК 620.179.16: 620.179.17

С. Ю. ПЛЕСНЕЦОВ**МЕТОД ТА ЗАСІБ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТНО-АКУСТИЧНОГО КОНТРОЛЮ ФЕРОМАГНІТНИХ МЕТАЛОВИРОБІВ ЗІ СКЛАДНОЮ ФОРМОЮ ПЕРЕТИНУ З НЕВЕЛИКИМ РОЗМІРОМ**

Виконано огляд засад для розробки та поглиблення методів електромагнітно-акустичного контролю металовиробів. Розглянуто основні дефекти металовиробів, які зазвичай виявляються електромагнітно-акустичним методом. Розглянуто поняття електромагнітно-акустичного перетворювача. Описано можливості та обмеження розробленого методу електромагнітно-акустичного контролю. Сформульовано задачу з розробки електромагнітно-акустичного перетворювача та пов'язаного методу безконтактного ультразвукового електромагнітно-акустичного (ЕМА) методу збудження та прийому ультразвукових імпульсів. Встановлено засади контролю імпульсами недиспергуючих крутильних хвиль протяжних трубчатих феромагнітних металовиробів зі складною формою перетину, нове виконання якого дозволило б забезпечити підвищення достовірності виявлення дефектів. Розглянуто теоретичні питання формування ультразвукових імпульсів недиспергуючих крутильних хвиль шляхом одночасного збудження поляризованого магнітного поля та збудження високочастотного електромагнітного поля високочастотною прохідною котушкою, що повторює форму перетину виробу, прийом з виробу ультразвукових імпульсів високочастотною прохідною котушкою при дії поляризованого магнітного поля і прийняття рішення про якість виробу по результатам аналізу параметрів прийнятих ультразвукових імпульсів. Наведено часові розгортки реалізації розробленого методу електромагнітно-акустичного перетворення ультразвукових коливань. Наведено технічний опис реалізації розробленого методу через електромагнітно-акустичний перетворювач. Наведено опис експериментальної перевірки розробленого методу електромагнітно-акустичного перетворення на відрізьку виробу у вигляді труби з перетином у вигляді прямокутника з розміром сторони 12 мм товщиною стінки 2 мм, виготовленої зі сталі ст.3. Доведено можливість виявлення дефектів з відношенням амплітуд відбитого сигналу та шуму не менше 20 дБ при відстані від ЕМАП до дефекту 150 мм.

Ключові слова: ультразвуковий контроль, електромагнітно-акустичний перетворювач, метод, модель, експериментальні дослідження, дефекти металу, стрижневі вироби, трубчасті вироби

С. Ю. ПЛЕСНЕЦОВ**МЕТОД И СРЕДСТВО УЛЬТРАЗВУКОВОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЙ СО СЛОЖНОЙ ФОРМОЙ СЕЧЕНИЯ С НЕБОЛЬШИМИ РАЗМЕРАМИ**

Выполнен обзор основ для разработки и углубления методов электромагнитно-акустического контроля металлоизделий. Рассмотрены основные дефекты металлоизделий, которые обычно оказываются электромагнитно-акустическим методом. Рассмотрены понятия электромагнитно-акустического перетворювача. Описаны возможности и ограничения разработанного метода электромагнитно-акустического контроля. Сформулирована задача по разработке электромагнитно-акустического преобразователя и связанного метода бесконтактного ультразвукового электромагнитно-акустического (ЭМА) метода возбуждения и приема ультразвуковых импульсов. Установлены принципы контроля импульсами недиспергирующих крутильных волн протяженных трубчатых ферромагнитных металлоизделий со сложной формой сечения, новое исполнение которого позволило бы обеспечить повышение достоверности обнаружения дефектов. Рассмотрены теоретические вопросы формирования ультразвуковых импульсов недиспергирующих крутильных волн путем одновременного возбуждения поляризованного магнитного поля и возбуждения высокочастотного электромагнитного поля высокочастотной проходной катушкой, повторяет форму сечения изделия, прием с изделия ультразвуковых импульсов высокочастотной проходной катушкой при воздействии поляризованного магнитного поля и принятия решения о качестве изделия по результатам анализа параметров принятых ультразвуковых импульсов. Приведены временные развертки реализации разработанного метода электромагнитно-акустического преобразования ультразвуковых колебаний. Приведены техническое описание реализации разработанного метода через электромагнитно-акустический преобразователь. Приведено описание экспериментальной проверки разработанного метода электромагнитно-акустического преобразования на отрезке изделия в виде трубы с сечением в виде прямоугольника с размером стороны 12 мм толщиной стенки 2 мм, изготовленной из стали ст.3. Доказана возможность выявления дефектов с отношением амплитуд отраженного сигнала и шума не менее 20 дБ при расстоянии от ЭМАП к дефекту 150 мм.

Ключевые слова: ультразвуковой контроль, электромагнитно-акустический преобразователь, метод, модель, экспериментальные исследования, дефекты металла, стержневые изделия, трубчатые изделия

S. Yu. PLESNETSOV**METHOD AND MEANS OF ULTRASONIC ELECTROMAGNETIC-ACOUSTIC TESTING OF FERROMAGNETIC METAL PRODUCTS WITH COMPLEX SECTION SHAPE AND SMALL SIZES**

A review of the foundations for the development and deepening of methods of electromagnetic-acoustic testing of metal products is performed. The main defects of hardware, which can be revealed via electromagnetic-acoustic method, are considered. The concepts of electromagnetic acoustic transducer are considered. The possibilities and limitations of the developed method of electromagnetic-acoustic control are described. The task of developing an electromagnetic-acoustic transducer and the associated method of a contactless ultrasonic electromagnetic-acoustic (EMA) method for exciting and receiving ultrasonic pulses is formulated. The principles of impulse control of non-dispersive torsional waves of extended tubular ferromagnetic products with a complex cross-sectional shape have been established, a new version of which would ensure an increase in the reliability of detection of defects. The theoretical issues of the formation of ultrasonic pulses of non-dispersive torsion waves by simultaneous excitation of a polarizing magnetic field and the excitation of a high-frequency electromagnetic field by a high-frequency pass coil are considered. analysis of the parameters of the received ultrasonic pulses. The time sweeps of the implementation of the developed method of electromagnetic-acoustic conversion of ultrasonic vibrations are given. A technical description of the implementation of the developed method through an electromagnetic-acoustic transducer is given. A description of the experimental verification of the developed method of electromagnetic-acoustic conversion on a piece of a product in the form of a pipe with a cross section in the form of a rectangle with a side size of 12 mm and a wall thickness of 2 mm, made of steel st. 3, is given. The possibility of detecting defects with a ratio of the amplitudes of the reflected signal and noise of at least 20 dB at a distance of 150 mm from the EMAT to the defect has been proven.

Keywords: ultrasonic testing, electromagnetic-acoustic transducer, method, model, experimental studies, metal defects, core products, tubular products.

Вступ. Технічний розвиток в країні визначається двома основними напрямками. Найявністю досконалих технологій отримання нових матеріалів, речовин та виробів і відповідних методів та засобів контролю і діагностики, як при виробництві, так і при експлуатації [1, 2].

Значні складнощі виникають під час виконання контролю феромагнітних металевих виробів (рис. 1) [3], таких як металеві трубки (рис. 1а), стрижні (рис. 1б), лист (рис. 1.в), тощо. Найявність іржі, фарби, окалини вимагають значних матеріальних втрат для спеціальної підготовки поверхні об'єкту контролю (ОК) [4]. Ультразвуковий контроль катаних виробів типу трубок та стрижнів незначного перетину вимагають значних втрат часу на проведення дефектоскопії [5]. Як показано в роботі [6] вирішити проблему можливо за рахунок використання безконтактного ультразвукового електромагнітно-акустичного (ЕМА) методу збудження та прийому ультразвукових імпульсів. ЕМА метод дозволяє контролювати трубки та стрижні практично любого перетину. Проте для трубок еліптичного перетину високоефективними ультразвуковими імпульсами крутильних коливань необхідно розробити метод і ЕМА перетворювачі (ЕМАП), які повинні забезпечити проведення автоматичного контролю під час виробництва таких ОК.

Сталеві трубки знаходять широке застосування в більшості галузей промисловості України та за кордоном. Сталеві трубки малого діаметра широко застосовуються в енергетичній, атомній, хімічній та інших галузях промисловості. Також вони підлягають обов'язковому неруйнівному контролю [1]. Застосування традиційних контактних методів для такого контролю є складним і зазвичай вимагає значних витрат. Виявлення дефектів типу тріщин, розшарувань, пор, областей з аномаліями фізико-механічних характеристик і т.п. в стінках трубок вимагає ефективного застосування недиспергуючих крутильних хвиль, які можливо збуджувати з достатніми характеристиками тільки за допомогою безконтактного електромагнітно-акустичного (ЕМА) способу збудження і прийому ультразвукових імпульсів. Такі хвилі забезпечують високу чутливість до дефектів і значну стійкість до впливу перешкод різного виду при контролі трубок малого діаметру, виготовлених з феромагнітних матеріалів.

Дефекти труб, як і багато інших властивостей, піддаються опису і систематизації, в зв'язку, з чим і була створена своєрідна класифікація дефектів труб і сполучних деталей трубопроводів (СДТ):

1. Поверхневі дефекти основного металу

Дані пошкодження виникають безпосередньо при процесі прокату листів, а так само при навантаженні,

розвантаженні, монтажі та їх транспортуванні. До дефектів, що утворюються в процесі прокату відносяться: закати, надриви, подряпини, тріщини напруги, продири, риси, волосовини, розкатні тріщини, злиточна плівка, прокатна плівка і ін. До дефектів цієї ж категорії, утворення яких не пов'язано з прокатом, відносяться: забоїни, риси, задирки, подряпини, подрізи.

2. Поверхневі дефекти заводських зварних швів

Дефекти даної категорії з'являються при виготовленні заготовок труб і СДТ. До дефектів даної групи відносяться: тріщини, раковини, шлакові включення, бризки металу, подрізи зони сплаву, свищі в зварному шві, мікротріщини, поверхневе окислення зварного шва.

3. Внутрішні дефекти основного металу

Дефекти даної категорії виникають при виробництві заготовок литтям. Сюди відносяться такі дефекти: холодна, гаряча і межкристаллічеськая тріщини, флок, ізоляція, металеве і нематалічеськое включення, газова раковина, сітвiднoї раковина, усадочная раковина.

4. Внутрішні дефекти заводських зварних швів

Виникають при навантаженні, розвантаженні, виготовленні, а також транспортуванні, зберіганні, монтажі і безпосередньо використанні. До дефектів цієї категорії відносяться: тріщини, раковини, шлакові включення, незплавлення, пори.

5. Дефекти геометрії заводських зварних швів

Як і дефекти попередньої групи, дефекти даної категорії можуть з'являтися в результаті експлуатації, монтажу, зберігання, транспортування, розвантаження, навантаження і виготовлення. Дефектами даної групи є: наплив на зварному з'єднанні, увігнутість кореня шва, зміщення кромок.

6. Дефекти геометрії труб і СДТ

Виникнення дефектів геометрії труб і СДТ пов'язане з монтажем, експлуатацією, зберіганням, транспортуванням, а також виготовленням, і вантажно-розвантажувальними роботами. Дефектами даної категорії є: гофр, кривизна, вм'ятини, овальність.

До характерних дефектів листового металу можна віднести наступні:

– розшарування – дефект поверхні у вигляді тріщин на крайках і торцях листів та інших видів прокату, що утворилися при наявності в металі усадочних дефектів, внутрішніх розривів, підвищеного забруднення неметалевими включеннями і при пережоге;

– захід – дефект поверхні, що представляє собою прикататся поздовжній виступ, що утворився в результаті зачистки вуса, подрізу, грубих слідів зачистки і глибоких рисок.

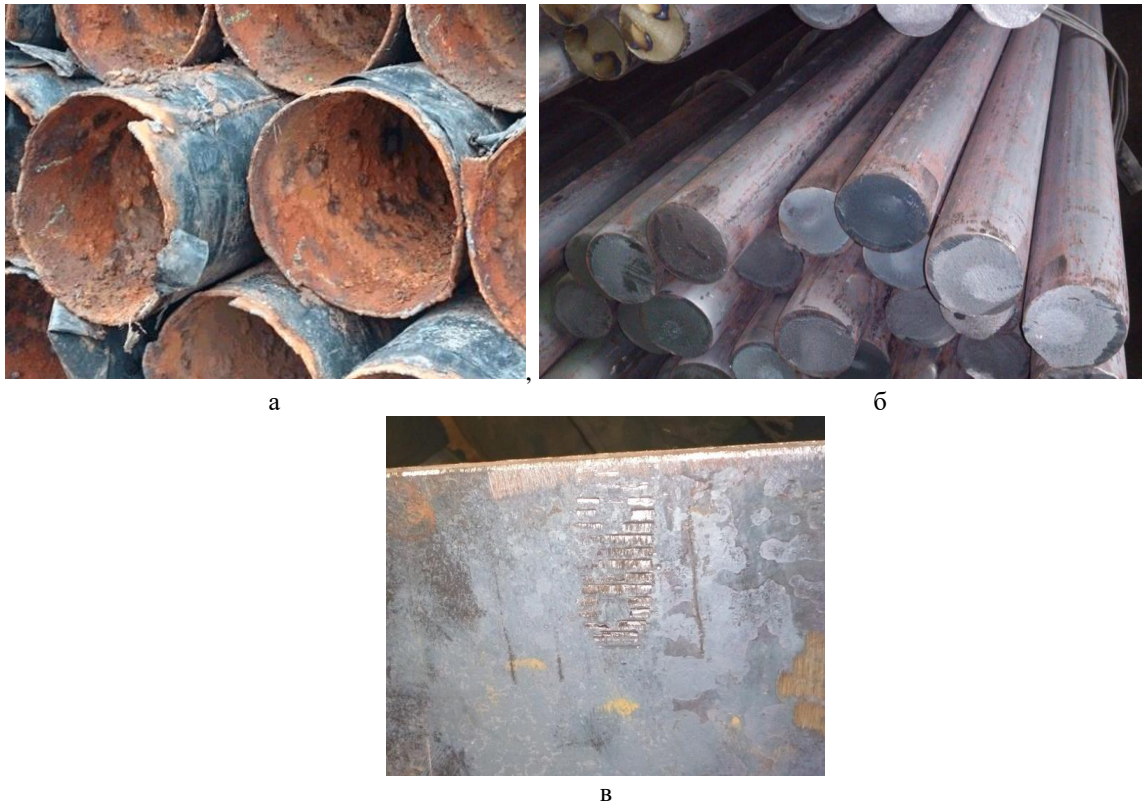


Рис. 1 – Типові дефекти трубчастих, стрижневих та листових металовиробів: а – заіржавління внутрішньої поверхні труб; б – поверхневі дефекти стрижневих виробів; в – поверхневий дефект листового виробу

– прокатна плівка – дефект поверхні, що представляє собою відшарування металу язикообразної форми, поєднане з основним металом однією стороною, рванина розкатування чи розковування, підрізів, слідів глибокої зачистки дефектів або сильної вироблення валків, а також грубих механічних пошкоджень

– деформаційна рванина – дефект поверхні у вигляді розкритої розриву, розташованого поперек або під кутом до напрямку найбільшої витяжки металу при прокатці або куванні, що утворився внаслідок зниженою пластичності металу

– тріщина напруги – дефект поверхні, що представляє собою розрив металу, який спрямовано вглиб під прямим кутом до поверхні, що утворився внаслідок напруг, пов'язаних зі структурними перетвореннями або нерівномірним нагріванням і охолодженням.

Особливий інтерес при виготовленні металовиробів представляють поверхневі дефекти, виявлення яких в процесі виробництва може бути складним або вимагає значних витрат часу.

Застосування для контролю таких виробів традиційних контактних методів складно і дорого через витрати на зачистку виробів і необхідності примі-вати контактної рідини. Для виявлення в стінках трубок дефектів виду тріщин, розшарувань, пор, областей з аномаліями фізико-механічних характеристик та ін. Ефективне застосування недиспергуючих крутильних хвиль, які можливо ефективно збуджувати тільки за допомогою безконтактного електромагнітно – акустичного

способу збудження і прийому ультразвукових імпульсів. Недиспергуючі крутильні хвилі [1] мають високу чутливість до дефектів і значну стійкість до впливу перешкод різного виду при ультразвуковому контролі феромагнітних стрижнів малого діаметра. Однак в інформаційних джерелах відомостей про теоретичні і модельні дослідження щодо збудження недиспергуючих крутильних хвиль ЕМАП не виявлено.

Мета роботи. Створення методу та засобу для ультразвукового контролю імпульсами недиспергуючих крутильних коливань трубок та стрижнів з незначною величиною перетину з використанням ЕМАП.

Основна частина. Під поняттям ЕМАП розуміють систему з розподіленими параметрами, що складається з джерела постійного магнітного поля, джерела змінного магнітного поля і деякого об'єму металу, де відбуваються процеси перетворення електромагнітної енергії в енергію УЗК. При цьому враховуються магнітострикційні ефекти та пондеромоторна дія електромагнітного поля у феромагнітних і неферомагнітних електропровідних матеріалах відповідно.

Розроблений метод може бути використано для виявлення дефектів в феромагнітному матеріалі трубчастих виробів, форма перетину яких може бути еліптичною, квадратною, прямокутною тощо. Як правило найбільший перетин ОК не повинен перевищувати 50 мм.

В основу розробки покладено завдання створити метод ультразвукового електромагнітно-акустичного

контролю імпульсами недиспергуючих крутильних хвиль протяжних трубчатих феромагнітних металовиробів зі складною формою перетину, нове виконання якого дозволило б забезпечити підвищення достовірності виявлення дефектів.

Для вирішення поставленої задачі розроблено метод ультразвукового електромагнітно-акустичного контролю протяжних трубчатих феромагнітних металовиробів з складною формою перетину [7], в якому виконують формування ультразвукових імпульсів недиспергуючих крутильних хвиль шляхом одночасного збудження поляризованого магнітного поля та збудження високочастотного електромагнітного поля високочастотною прохідною котушкою, що повторює форму перетину виробу, прийом з виробу ультразвукових імпульсів високочастотною прохідною котушкою при дії поляризованого магнітного поля і прийняття рішення

про якість виробу по результатам аналізу параметрів прийнятих ультразвукових імпульсів, при цьому збудження поляризованого магнітного поля виконують шляхом пропускання через ділянку виробу, що знаходиться під високочастотною прохідною котушкою, імпульсного електричного струму, час t дії якого визначається за формулою

$$t = (l + 2L) / C,$$

де l – довжина ділянки виробу під високочастотною прохідною котушкою, мм;

L – відстань, з якої очікується прийом відбитих з виробу ультразвукових імпульсів, мм;

C – швидкість розповсюдження ультразвукових імпульсів в матеріалі виробу, мм/мкс.

Схема реалізації розробленого методу наведена на рис.2.

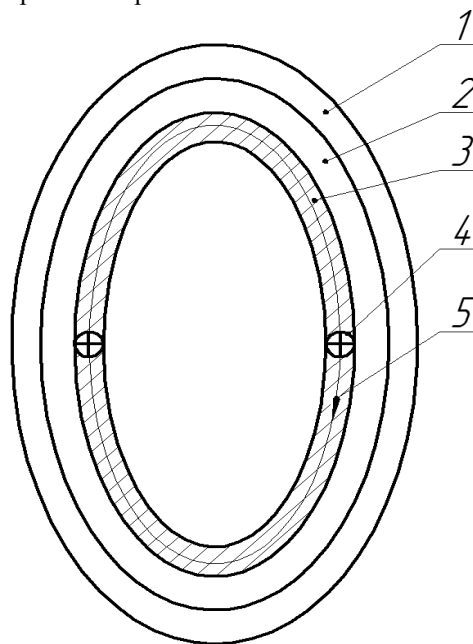


Рис. 2 – Спрощена схема пристрою для реалізації розробленого методу [7]

На рис. 2 позначено: 1 – високочастотна прохідна котушка, що повторює форму перетину виробу; 2 – повітряний прошарок між високочастотною прохідною котушкою та виробом; 3 – протяжний виріб (перетин), що контролюється; 4 – напрямок дії струму, який створює поляризоване магнітне поле в тілі феромагнітного виробу; 5 – силова лінія поляризованого магнітного поля в тілі феромагнітного виробу.

Часові розгортки реалізації розробленого методу наведено на рис. 3.

На рис. 3 позначено: а) розгортка з часом t тривалості дії імпульсного електричного струму, який створює поляризоване магнітне поле в тілі феромагнітного виробу; б) розгортка з моментом та часом $3l$ дії високочастотного електромагнітного поля, збудженого високочастотною прохідною котушкою при пропусканні високочастотного струму; в) часова розгортка, яка отримана при прийомі високочастотною

прохідною котушкою імпульсу UD відбитого від дефекту в матеріалі виробу після збудження зондування імпульсу $3l$.

Даний метод реалізується наступним чином. Протяжний виріб 3 розміщується в порожнині високочастотної прохідної котушки 1. Через виріб 1 вздовж його утворюючої пропускається імпульс струму I_0 (рис. 2, а), наприклад через контакти, які встановлені з двох сторін високочастотної прохідної котушки 1.

Час дії імпульсу струму I_0 визначається за виразом

$$t = (l + 2L) / C,$$

де l – ширина високочастотної прохідної котушки, мм;

L – відстань, з якої очікується прийом відбитих з виробу ультразвукових імпульсів, мм;

C – швидкість розповсюдження ультразвукових імпульсів в матеріалі виробу, мм/мкс.

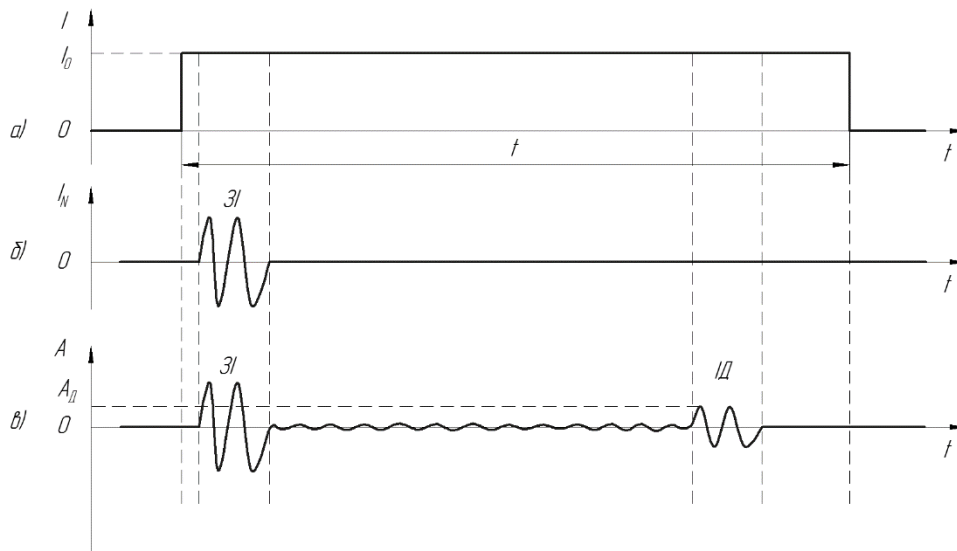


Рис. 3 – Часові розгортки, що демонструють процес реалізації розробленого методу [6]

Час t дії імпульсу струму I_0 , наприклад в напрямку 4 або в зворотному напрямку, необхідний для забезпечення повного циклу збудження-прийм при ультразвуковому контролі ділянки протяжного виробу 3 довжиною L з урахуванням ширини l високочастотної прохідної котушки 1. В перетині виробу 3 формуються силові магнітні лінії 5 (рис.1), які повторюють форму перетину виробу 3. Після включення струму I_0 через високочастотну прохідну котушку 1 пропускають імпульс $3I$ високочастотного струму (рис.2б), який формує високочастотне електромагнітне поле, а воно в свою чергу збуджує струм Фуко в виробі 3. Взаємодія струмів Фуко і поляризованого магнітного поля 5 призводить до збудження зсувних напружень і тобто збуджуються імпульси недиспергованих крутильних коливань, які мають значну амплітуду і розповсюджуються на значні відстані в протяжному виробі 3. При наявності в виробі 3 дефекту імпульси недиспергованих крутильних коливань відбиваються і приймаються високочастотною прохідною котушкою 1 за рахунок зворотного електромагнітно-акустичного ефекту. Якість виробу 3 оцінюють по результатам аналізу параметрів прийнятого ультразвукового імпульсу II (рис.2в), наприклад за величиною амплітуди A_d .

Перевірка розробленого методу та моделі ЕМА перетворювача виконана на відрізку виробу у вигляді труби з перетином у вигляді прямокутника з розміром сторони 12 мм товщиною стінки 2 мм, виготовленої зі сталі ст.3. У взірці для дослідження було виконано поздовжню модель дефекту глибиною 0,15 мм та довжиною 20 мм. Джерело живлення виготовлено на основі вихідного силового транзистора, який формував струм в зразку величиною близько 2,5 А та часовою тривалістю близько 1 ms. Котушка індуктивності намотана дротом діаметром 0,2 мм і мають по 20 витків кожна. Високочастотна котушка індуктивності ЕМАП живилася від генератора зондуючи імпульсів струмом з піковим значенням до 200 А, часовою тривалістю від 1 до 10 періодів частоти заповнення, яка регулювалася

в інтервалі 0,1–1,5 МГц. В результаті досліджень виявлялася модель дефекту з відношенням амплітуд відбитого сигналу та шуму не менше 20 дБ при відстані від ЕМАП до дефекту 150 мм.

Висновки. Технічним результатом розробки є те, метод, який забезпечує збудження крутильних бездисперсійних ультразвукових коливань, які мають високу чутливість щодо виявлення дефектів. Достовірність ультразвукового контролю трубчатих феромагнітних металовиробів зі складним перетином підвищується.

Список літератури

1. Крауткремер Й., Крауткремер Г. *Ультразвуковой контроль материалов*. Справочник., М.: Металлургия, 1991.– 673 с.
2. Патон Б. С., Троїцький В. О., Посипайко Ю. М. *Неруйнівний контроль в Україні*. Інформ. бюл. Українського товариства неруйнівного контролю та технічної діагностики. – 2003. – №2(18). – С. 5–9.
3. *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.
4. Плєснецов С.Ю., Сучков Г.М., Корж А.И., Суворова М.Д. *Новые теоретические исследования и разработки в области электромагнитно-акустического преобразования. (Обзор) // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2018. №2. С. 24-31.*
5. Ноздрачова К. Л. *Експрес – метод ультразвукового контролю довгомірних виробів* : дис. канд. техн. наук : 05.11.13 / Ноздрачова Катерина Леонидівна – Харків, 2011.
6. Сучков Г.М. *Развитие теории и практики создания приборов для электромагнитно – акустического контроля металлоизделий*. Дис. д.т.н. НТУ «ХПИ», Харьков, 2005. 521 с.
7. Плєснецов С.Ю., Петрищев О.М., Сучков Г.М., Мітін О.В. *Метод та засіб ультразвукового електромагнітно-акустичного контролю феромагнітних металовиробів зі складною формою перетину з невеликим розміром*. Патент України № а 2017 11614

References (transliterated)

1. Krautkremer J., Krautkremer G. *Ul'trazvukovoj kontrol' materialov. Spravochnik* [Ultrasonic testing of materials. Handbook]. Moscow: Metallurgiya, 1991. – 673 p.
2. Paton B. S., Troic'kij V. O., Posipajko YU. M. *Nerujnivnij kontrol' v Ukraini* [Nondestructive testing in Ukraine]. Inform. byul. Ukraїns'kogo tovaristva nerujnivnogo kontrolyu ta tekhnichnoyi diagnostiki. –2003. –№2(18). – P. 5–9.

3. I.N. Ermolov, YU.V. Lange. *Nerazrushayushchij kontrol': Spravochnik: V 7 t.* [Nondestructive Testing: Handbook. In 7 volumes] Ed. V.V. Klyuev. T.3: *Ul'trazvukovoj kontrol'* [Volume 3. Ultrasonic Testing]. Moscow: Mashinostroenie, 2004. 864 p.
4. Plesnetsov S.Yu., Suchkov G.M., Korzh A.I., Suvorova M.D. *Novye teoreticheskie issledovaniya i razrabotki v oblasti ehlektromagnitno-akusticheskogo preobrazovaniya. (Obzor)* [New developments in production of electromagnetic-acoustic transducers (review)]. *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchij kontrol'*. 2018. No2. P. 24-31.
5. Nozdrachova K.L. *Ekspres-metod ul'trazvukovogo kontrolyu dovgomirnih virobiv. Dis. k.t.n.* [Express-method of elongated product ultrasonic testing. PhD dissertation] NTU «KhPI», Kharkiv, 2011. 179 p.
6. Suchkov G.M. *Razvitie teorii i praktiki sozdaniya priborov dlya ehlektromagnitno – akusticheskogo kontrolya metalloizdelij* [Development of theory and practice of metal product electromagnetic-acoustic testing device creation]. D.t.s. diss. NTU «KhPI», Kharkiv, 2005. 521 p.
7. Plesnetsov S.Yu., Petrishchev O.M., Suchkov G.M., Mitin O.V. *Metod ta zasib ul'trazvukovogo elektromagnitno-akustichnogo kontrolyu feromagnitnih metalovirobiv zi skladnoyu formoyu peretinu z nevelikim rozmirom* [Method and means of ultrasonic electromagnetic-acoustic testing of ferromagnetic metal products with complex section shape and small sizes]. Patent of Ukraine № a 2017 11614

Надійшла (received) 26.08.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Плеснецов Сергій Юрійович (Плеснецов Сергей Юрьевич, Plesnetsov Sergey Yurievich) – кандидат технічних наук, докторант каф. КРСКД НТУ «ХПІ»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8428-5426>; e-mail: s.plesnetsov@gmail.com