

УДК 620.179.16: 620.179.17

С.Ю. ПЛЕСНЕЦОВ**МЕТОДИ І ЗАСОБИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЮ МЕТАЛОВИРОБІВ
ТРУБЧАТОГО, СТРИЖНЕВОГО ТА ПЛАСТИНЧАТОГО ТИПУ (ОГЛЯД Ч.1)**

Розглянуті основні засоби для проведення контролю металовиробів ультразвуковими та електромагнітно-акустичними засобами. Серед контрольованих виробів присутні стрижнеподібні, трубчаті, пластинчаті та інші вироби, які виготовляються на вітчизняних та зарубіжних підприємствах, як нові, так і ті, що знаходяться в експлуатації. Описані переваги та недоліки методів, їх вплив на продуктивність та якість оцінювання стану продукції, виявлення дефектів. Охарактеризовано типи коливань, що використовуються у наведених методах, та їх вплив на кінцевий результат тестування. Розглянуто взаємовплив матеріалів та ультразвукових коливань, а також вплив матеріалів на кінцеві результати контролю.

Ключові слова: трубчастий виріб, труба, стрижень, пластина, контроль електромагнітно-акустичний, методи, засоби, хвиля, коливання

Рассмотрены основные средства для проведения контроля металлоизделий ультразвуковыми и электромагнитно-акустическими средствами. Среди контролируемых изделий присутствуют стрижнеподобные, трубчатые, пластинчатые и другие изделия, которые изготавливаются на отечественных и зарубежных предприятиях, как новые, так и находящиеся в эксплуатации. Описаны преимущества и недостатки методов, их влияние на производительность и качество оценки состояния продукции, выявления дефектов. Охарактеризованы типы колебаний, что используются в приведенных методах, и их влияние на конечный результат тестирования. Рассмотрены взаимовлияние материалов и ультразвуковых колебаний, а также влияние материалов на конечные результаты контроля.

Ключевые слова: трубчатое изделие, труба, стержень, пластина, контроль электромагнитно-акустический, методы, средства, волна, колебания.

The basic means for control of metal products by ultrasonic and electromagnetic acoustic means are considered. Among the controlled products, there are pivot, tubular, plate and other products that are manufactured at domestic and foreign enterprises, both new and in service. The advantages and disadvantages of the methods, their influence on productivity and quality of the estimation of the state of products, defects detection are described. The types of bumps used in the above methods and their influence on the final result of testing are described. The mutual influence of materials and ultrasonic vibrations, as well as the influence of materials on the final results of control are considered. Contact and non-contact ultrasonic electromagnetic-acoustic transducers are considered. Physical principles of electromagnetic-acoustic transduction are provided. Mathematical equations for evaluation of physical parameters required for sample testing are provided. Theoretical and experimental concepts and prototype schematics for non-contact electromagnetic-acoustic ultrasonic experimental transducer are given. Results of experimental evaluation of electromagnetic-acoustic prototype transducer are given. Calculative schemes for methodology of developed electromagnetic-acoustic transducer are provided. Effectiveness of non-contact transducers of electromagnetic-acoustic type for testing of tubular, plate and rod-type samples is evaluated and considered superior to contact-type transducers.

Keywords: tubular product, tube, rod, plate, electromagnetic acoustic control, methods, means, wave, oscillations

Актуальність теми. Підтримувати якість виробів, що виготовляються в промисловості можливо за рахунок використання неруйнівних методів контролю. Одним з основних неруйнівних методів є ультразвуковий [1–18]. Він дає можливість проведення контролю та діагностики в різних умовах, портативними приладами та автоматичними системами. Контролюватися можуть вироби з металу, пластиків, бетону, багатопарові конструкції тощо. До цього часу найбільші об'єми контролю та діагностики мають вироби з металу, як такі, що мають великі об'єми випуску та що знаходяться в експлуатації. Традиційні методи контролю та діагностики застосовують контактні методи з використанням спеціальних рідин, що не завжди може бути ефективним. Так контроль при використанні виробів з забрудненою або кородованою поверхнею, з різними покриттями, в гарячому або холодному стані тощо не завжди можливий [3, 10–11, 16] чи має низьку достовірність. Контактний контроль часто має недостатню ефективність при діагностиці поверхонь металовиробів трубчатого та стрижневого типу та листів.

Суттєво підвищити можливості дефектоскопії можливо за рахунок використання безконтактних методів, тобто без використання контактної рідини.

Найбільш розвиненим на цей час є електромагнітно – акустичний (ЕМА) спосіб збудження і прийому ультразвукових імпульсів [3, 6, 11, 13, 16, 18]. ЕМА спосіб дозволяє збуджувати всі відомі типи ультразвукових хвиль [3], в тому числі поверхневі та нормального типу, які можуть ефективно використовуватися для дефектоскопії виробів трубчатого та стрижневого типу, особливо невеликого діаметру.

Електромагнітно-акустичний спосіб неруйнівного контролю зародився на стику декількох наукових напрямів, що мають різну фізичну сутність. Для його опису потрібне використання апаратів електродинаміки і термодинаміки, теорії пружності, феромагнетизму, акустики, матеріалознавства, а застосування поширюється на дефектоскопію, товщинометрії і визначення фізико-механічних властивостей матеріалів. Багатогранність і обсяг необхідних наукових і технічних рішень призвели до значних труднощів при створенні приладів і пристроїв, що використовують ЕМА спосіб на практиці. В відомих теоретичних дослідженнях на цей час не достатній мірі розглянуто питання збудження та прийому ультразвукових хвиль нормального типу: крутильних, Релея, Лемба тощо. Особливо це важливо для дефектоскопії виробів з феромагнітних матеріалів. У літературі також відзначається [10–11],

що цей спосіб має низьку чутливість, значну «мертву» зону, істотну складність апаратури.

Багатогранність і обсяг необхідних наукових і технічних рішень призвели до значних труднощів при створенні приладів і пристроїв, що використовують ЕМА спосіб на практиці. Проте рішення поставленої проблеми вимагають підприємства, які випускають трубки, стрижні, листи, виготовлені з феромагнітних і не феромагнітних електропровідних матеріалів.

Таким чином, значні потенційні переваги, з одного боку, недоліки і складність реалізації, з іншого боку, призвели до появи важливої для промисловості наукової проблеми. Її суть полягає в розвитку теорії і практики створення нових методів та приладів на основі ЕМА способу, що забезпечують виявлення дефектів в електропровідних феромагнітних виробках.

Отже, вирішення проблеми створення теоретичних та практичних засад з підвищення ефективності ультразвукового ЕМА контролю є соціально значущим, актуальним і своєчасним.

Основна частина

Серед методів неруйнівного контролю протяжних виробів при виробництві та експлуатації ультразвукові методи займають основне місце і вельми інтенсивно розвиваються. Одною з основних причин широкого поширення ультразвукових методів полягає в тому, що збудження і поширення механічних коливань тісно пов'язане з пружними і іншими характеристиками матеріалів. Найбільш широко застосовуються традиційні методи, для яких є обов'язковим застосування контактної рідини. Інтенсивно розвиваються і безконтактні методи контролю без використання контактної рідини.

Кожний з наведених методів мають свої переваги і недоліки. Аналіз цих методів дозволить визначити їх можливості і умови застосування, а також галузі використання.

Простеживши основні тенденції розвитку контактного і безконтактного методів неруйнівного контролю можна оцінити загальні напрямки і стан розробок засобів ультразвукового контролю (УЗК) якості виробів, що важливо для подальшого його розвитку.

Контактний акустичний контроль

1. Різновиди контактних методів контролю

Згідно ГОСТ 23829 акустичні методи контролю ділять на дві групи: ті що використовують випромінювання і прийом акустичних коливань і хвиль (активні методи) і засновані тільки на прийомі коливань і хвиль (пасивні методи) [10]. Далі, як найбільш поширені, будуть розглянуті активні методи контролю та вимірювань [10–13]. Найчастіше використовують методи проходження і методи відбиття [10, 19–20]. Застосовують як безперервне, так і імпульсне випромінювання [11]. Серед методів проходження слід зазначити наступні методи [10, 19]. Амплітудний метод проходження, заснований на реєстрації зменшення амплітуди наскрізного сигналу під впливом дефекту, що утрудняє проходження сигналу і створює звукову тінь [20]. Часовий метод проходження, заснований на вимірюванні запізнювання імпульсу, викликаного обминанням дефекту хвилею [21].

Методи відображення базуються на аналізі

сигналів, відбитих з об'єкту контролю [10–18]. Прийнятий сигнал залежить від форми, орієнтації, розташування дефекту і заповнюючого його матеріалу [22], а також від характеристик об'єкту контролю (ОК). Крім згаданого, використовують різновиди методів відлуння: луна - дзеркальний, дельта - метод, дифракційно - часовий та інші [10, 21, 23–25]. Ці методи в промислових умовах реалізуються рідко, оскільки вимагають особливих умов використання та більш складної і дорогої апаратури.

Досить широко застосовують комбіновані методи акустичного контролю і вимірювань. Серед них слід відзначити дзеркально-тіньовий, луна-тіньовий, луна-наскрізний [10, 20, 24, 27].

Для реалізації описаних ультразвукових контактних методів контролю застосовуються різні способи передачі і прийому пружних коливань: контактний, щілинний і іммерсійний [10].

Контактний спосіб полягає в розміщенні п'єзoeлектричного перетворювача (ПЕП) на поверхні ОК, попередньо змащеної, наприклад оливою. При цьому постійно витрачається контактна рідина. Для реалізації контактного способу поверхню ОК має бути дуже гладкою (нерівності не повинні перевищувати 10...40 мкм). Якщо поверхня виробу шорстка, то випадкові зміни амплітуди корисних сигналів досягають 20 дБ [3, 16, 28] і більше, що істотно знижує достовірність контролю.

Щілинний спосіб передбачає створення між ПЕП і поверхнею ОК зазору величиною, який приблизно дорівнює довжині хвилі пружних коливань. Чутливість цього методу приблизно в 10 разів нижче контактного [11].

При іммерсійному способі між ПЕП і поверхнею ОК розміщують товстий шар контактної рідини [10–11, 25]. Чутливість цього методу приблизно в 100 разів нижче контактного.

Згадані контактні методи неруйнівного контролю не дозволяють ефективно використовувати поверхневі хвилі [10–11], так як загасання їх амплітуди залежить від наявності рідини на поверхні виробу. Не знайшли широкого застосування зсувні хвилі з різною орієнтацією вектора поляризації [3, 10, 28–30]. Не використовуються перспективні горизонтально - поляризовані хвилі [10–11]. Значні технічні труднощі становить контроль гарячих і холодних виробів, а також контроль з високою швидкістю переміщення виробу відносно ультразвукових перетворювачів [10–11]. Практично не використовуються в промислових умовах хвилі Релея, Лемба та перспективні крутильні коливання.

2. Типи пружних коливань, які використовуються в неруйнівному контролі ультразвуковим методом.

Типи пружних хвиль, які можуть існувати в матеріалах і середовищах, визначені шляхом вирішення хвильових рівнянь [31 - 33]. За допомогою рішення цих рівнянь можна показати, що в необмеженому просторі існують два типи хвиль: поздовжні хвилі і хвилі зсуву (поперечні), які поширюються з різною швидкістю. Об'ємні поздовжні і поперечні хвилі з частотою 0,5 ... 10 МГц найбільш широко використовують для контролю матеріалів

[10]. Ці хвилі оптимально виявляють дефекти при нормальному падінні на поверхню найбільшого їх розвитку. Майже не використовуються, зважаючи на неможливість їх збудження контактним методом, горизонтально - поляризовані хвилі, що мають цілий ряд позитивних експлуатаційних якостей [3, 34–36].

В обмежених тілах існують поверхневі (Релея) і нормальні хвилі [10, 31–33] різного типу. Уздовж вільної поверхні твердого тіла можуть розповсюджуватися поверхневі хвилі. З їх допомогою виявляються дефекти, що виходять на поверхню. На глибині більшої довжини хвилі ультразвукових коливань поверхневими хвилями дефекти практично не виявляються [10, 31]. Слід зазначити, що контактним методом поверхневі хвилі використовуються для практичного контролю і вимірювань недостатньо. Це обумовлено необхідністю застосування контактної рідини, що є значним недоліком.

Якщо тіло має дві вільні поверхні (пластина), то в ньому можуть існувати нормальні хвилі, тобто хвилі, що біжать уздовж границь середовища і стоячі в перпендикулярному напрямку [10, 32–33]. Їх успішно застосовують для контролю тонких листів, оболонок, труб [10, 37–38]. Проте через вплив рідини на поверхні матеріалів на результати вимірювань практичне застосування контактної методу сильно обмежена. Через неможливість ефективного збудження не використовуються хвилі зсувного типу.

Хвилі, що виникають в стрижнях та трубах, подібні хвилям в пластинах [10, 39–41]. Їх успішно застосовують для контролю прутків різної форми, дроту, виробів зі складною формою перетину: рейки, швелери та інші. Проте і в цьому випадку використання контактної методу УЗК мало ефективне, оскільки на ультразвукові імпульси суттєво впливає наявність на поверхні виробу рідини. Достовірність контролю стає недостатньою. Окрім того, потрібна операція зачищення поверхні від бруду, окалини, окисів різного типу. В результаті процес використання УЗК значно дорожчає.

3. Вплив акустичних властивостей матеріалів на УЗК і вимірювання.

Властивості пружного середовища з точки зору поширення ультразвукових хвиль [6–7, 10–11, 13, 42–43] визначаються в першу чергу швидкостями поширення об'ємних хвиль. З їх допомогою обчислюються швидкості інших типів хвиль, а також константи пружності середовища. Важливим акустичним властивістю середовища є характеристичний імпеданс [11].

Ще одна важлива для поширення акустичних хвиль властивість середовища - загасання акустичних хвиль. Зазвичай коефіцієнт загасання δ визначають числом негативних децибел на ділянці шляху в 1м [4, 7, 11]. Коефіцієнт загасання складається з коефіцієнтів поглинання та розсіювання.

Ослаблення амплітуди ультразвукових імпульсів є однією з основних характеристик при оцінці якості виробу [10].

Відомо, що коефіцієнт поглинання для

поздовжніх хвиль більше, ніж для поперечних [4, 10–11]. Тому зсувним хвилям віддають перевагу при інших однакових умовах.

Істотним недоліком вимірювання загасання ультразвуку контактним методом є демпфірування ПЕП поверхнею матеріалу [44]. Усунути цей та вище відзначені недоліки можливо шляхом застосування безконтактного способу збудження та прийому ультразвукових імпульсів. Тому при виконанні неруйнівного контролю слід враховувати фактори загасання ультразвуку в ОК та в рідинному переході ПЕП - виріб.

Якщо існує два матеріали, то падаюча на границю розділу двох середовищ акустична хвиля частково проходить через границю, а частково відбивається від неї [10–11]. При цьому може відбуватися трансформація типів хвиль. У загальному випадку на границі виникають кілька типів хвиль - поздовжня і поперечна, поверхнева і т.п. В результаті може формуватися когерентна акустична перешкода. Цей фактор необхідно враховувати при розробці технологій і засобів контролю.

Зменшить кількість когерентних перешкод на границі введення УЗК в ОК можливо шляхом збудження ультразвукових коливань безпосередньо в метали, наприклад, електромагнітно - акустичним (ЕМА) способом [3, 10, 34–36, 41, 45–57]. При цьому прийом пружних коливань також слід проводити безпосередньо з поверхні металу.

4. Контактні електроакустичні перетворювачі.

В сучасних ультразвукових пристроях для збудження і прийому ультразвуку найчастіше використовують п'єзоелектричний ефект [58 - 59]. П'єзопластина ПЕП працює в умовах досить складного акустичного навантаження. Це призводить до більш жорстких вимог щодо вибору матеріалу елементів ПЕП, його розташування щодо поверхні ОК, якості поверхні матеріалу, його температури і т.д. В результаті, при контролі виробів з захисними покриттями (фарба, пластик і т.п.), забруднених, гарячих і холодних і т.д., акустичний контакт буде порушений і контроль буде ненадійним або зовсім неможливим. Ще більш складна ситуація виникає при скануванні ОК з високою швидкістю. Тобто високопродуктивний контроль за допомогою ПЕП майже неможливий.

Аналогічні недоліки має магнітострикційний метод ультразвукового контролю.

Вказані вище недоліки обумовлені збудженням ультразвукових імпульсів в окремому перетворювачі і в необхідності передачі збуджених імпульсів в ОК через контактну рідину (для високих частот). Відповідно, для забезпечення прийому необхідна контактна рідина для передачі ультразвукових імпульсів з ОК в перетворювач.

Виключити значне число зазначених недоліків можливо за рахунок застосування безконтактних методів ультразвукового контролю і вимірювань [3, 10]. Такий механізм можливо реалізувати, якщо в якості перетворювача (збуджувача та приймача) буде використано поверхню ОК.

Безконтактні методи збудження і прийому ультразвукових імпульсів

На сьогодні відомі різні способи безконтактного збудження і прийому ультразвукових імпульсів в твердих тілах, які не потребують для реалізації контактної рідини: механічне ударне [10]; термічні способи [10, 60–62]; електростатичним [10]; електромагнітно-акустичним [3, 10,] . В роботах [60–62] показана висока ефективність збудження ультразвукових хвиль з допомогою лазерного променя. Проте, прийом УЗК за допомогою інтерферометрів в промислових умовах практично не можливий. Автори роботи [65] пропонують використовувати для прийому збуджених лазером імпульсів електромагнітно – акустичний спосіб, що значно ускладнює і здорожує засоби ультразвукового контролю. Окрім того, при лазерному збудженні одночасно в виробі формується декілька типів ультразвукових хвиль, які формують когерентні завади, які важко врахувати при оцінці якості ОК. Тому, серед безконтактних методів ультразвукового контролю доцільно вибрати такі, що дають можливість як збуджувати так і приймати ультразвукові імпульси в традиційному діапазоні частот 0,1...10 МГц. На сьогодні найбільш розвиненими з них є електростатичний [10, 63–89,] та електромагнітно-акустичний [3, 10, 34–36] способи

безконтактного збудження і прийому ультразвукових імпульсів в твердих електропровідних та (або) феромагнітних матеріалах.

1. Електростатичний спосіб безконтактного збудження і прийому ультразвукових імпульсів в металовиробах

Електростатичний спосіб безконтактного збудження пружних коливань реалізується у двох варіантах. У першому з них – перетворювачі мікрофонного типу, він працює як конденсаторний мікрофон [10]. Рухливим елементом у ньому служить тонка фольга, натягнута над плоскою підставою й відділена від нього дуже малим зазором. Фольга з підставою утворюють конденсатор. При подачі на обкладки конденсатора змінної збудливої електричної напруги фольга притягується до підстави. Коливання від фольги до ОК передаються по повітрю, тобто використовується повітряно-акустичний зв'язок. Такий спосіб може бути реалізований тільки для низькочастотних УЗ коливань.

У другому (конденсаторному) варіанті однією з обкладок конденсатора служить сам ОК, рис.1. В такому датчику використовується пондеромоторна взаємодія зовнішньої пластини з електродом – ОК [73].

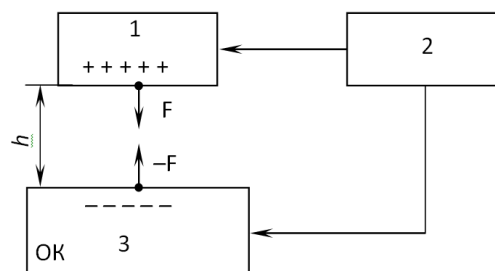


Рис. 1 – Схема взаємодії при перетворенні електричної енергії в акустичну:

1 – електрод ЄП; 2 – генератор змінної напруги; h – товщина прошарку; F – сила, яка діє між обкладками ЄП

Напруженість, що формує акустичне поле при його збудженні, можна оцінити, розглядаючи силу як похідну від енергії електричного поля конденсатора за напрямком переміщення поверхні об'єкта контролю, рис. 1. Для такої моделі запишемо

$$T = \frac{1}{S} \frac{d}{dh} \left(\frac{1}{2} V_{\approx}^2 C \right) = \frac{1}{S} \frac{d}{dh} \left(\frac{1}{2} V_{\approx}^2 \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{h} \right) = - \frac{V_{\approx}^2 \varepsilon_0 \varepsilon}{h^2}, \quad (1)$$

де C і S – ємність і площа конденсатора, $V_{\approx}$ – амплітуда змінної гармонійної напруги між обкладкою ємнісного перетворювача (ЄП) і виробом, h – відстань між обкладками ЄП і виробом, ε – відносна діелектрична проникність матеріалу, що заповнює h , ε_0 – абсолютна діелектрична постійна.

При різнойменних зарядах на обкладках конденсатора пластина й виріб притягуються. Максимальна сила притягання досягається двічі за

один період коливань змінної напруги високої частоти. Таким чином, виникає ефект подвоєння частоти акустичних коливань. Щоб уникнути подвоєння частоти акустичних коливань і підвищення в 2 рази ефективності перетворення електричної енергії в акустичну [75–76], необхідно подати на конденсатор постійну поляризуючу напругу $V_{\approx}$, що рівняється або перевищує змінну напругу $V_{\approx}$. Тоді

$$T = - \frac{V_{\approx} V_{\approx} \varepsilon_0 \varepsilon}{h^2}. \quad (2)$$

Скориставшись результатами роботи [68–69] визначимо ефективність перетворення ЄП шляхом спрощеного прорахунку у випадку збудження ультразвукових імпульсів. Нехай верхній електрод конденсатора нерухомий, $\varepsilon = 1$ (конденсатор повітряний), $V_{\approx} / h = 5 \cdot 10^6$ В/м (виходячи із припустимої пробійної напруги), $V_{\approx} = 0,5 V_{\approx}$. Звідси

знаходимо $T \approx 100$ Па, що приблизно в 1000 разів менше значення, що досягається за допомогою п'єзоелектричних перетворювачів. Аналогічна величина має місце й у випадку прийому акустичних імпульсів. Тоді, відповідно до загальноприйнятих теоретичних підходів, коефіцієнт перетворення для ЄП при збудженні й наступному прийомі акустичних

коливань буде майже в 10^6 разів менше, ніж для ПЕП. Для знаходження шляхів підвищення коефіцієнта перетворення розглянемо більш істотно випадок прийому акустичних коливань ЄП. Паралельно до однієї з торцевих поверхонь зразка, призначеної для ультразвукового дослідження, на відстані h розташовується електрод ЄП, рис. 2 [83–84, 88].

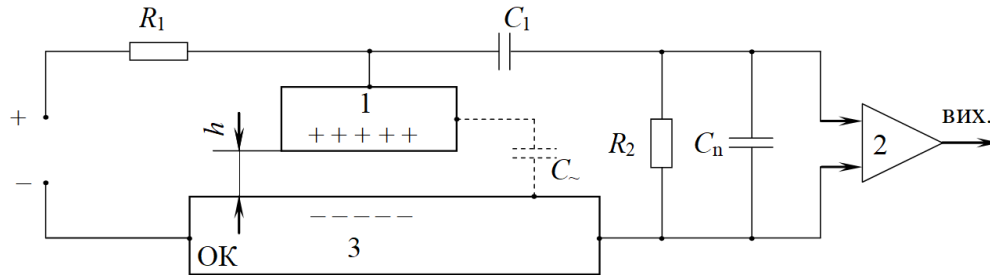


Рис. 2 – Модель для оцінки коефіцієнта перетворення при конденсаторному прийомі акустичних коливань з ОК: 1 - електрод ЄП; 2 - підсилювач; 3 - ОК; $C_{\sim}$ - змінна ємність конденсаторного перетворювача $R_{\sim}$ - баластний опір; C_i - розділюючий конденсатор; R_2 - вхідний опір підсилювача

Цей повітряний конденсатор поляризований постійною напругою, що подається через великий опір R . Ультразвукові імпульси змушують вібрувати поверхню зразка й тим самим модулюють повітряний прошарок, що є складовою частиною повітряного конденсатора. Високочастотний імпульс, що виникає на обкладках конденсатора може бути посилений і відповідним чином оцінений. У цьому випадку змінна напруга $U_{\sim}$, яка розвивається ЄП, описується виразом

$$U_{\sim} = \frac{A_{\sim}}{h} \frac{C_0}{C_0 + C_{\Pi}} U_{\pm}, \quad (3)$$

де $A_{\sim}$ – зміщення, сформоване ультразвуковою хвилею; h і C_0 – зазор і статична ємність прийомного ЄП; C_{Π} – сумарна паразитна ємність; $U_{\pm}$ – поляризуюча напруга.

Модель для виконання досліджень наведена на рис. 2 [81].

Коефіцієнт передачі для ланцюга, наведеного на рис. 2, без врахування струмів в опорах R_1 , R_2 ($R_1 \geq 1$ МОм), буде визначатися величиною [66–67]

$$K(f) = \frac{1}{\left(1 + \frac{C_{\Pi}}{C_0} + \frac{C_{\Pi}}{C_1}\right) - \frac{j}{2\pi f} \left(\frac{1}{R_1 C_0} + \frac{1}{R_2 C_1}\right)}, \quad (4)$$

де f – частота прийнятих акустичних коливань.

Тому, враховуючи максимальний коефіцієнт передачі, бажано мати C_0 максимальним. Однак збільшення ємності за рахунок зменшення прошарку h вимагає зниження поляризуючої напруги $U_{\pm}$. Крім того, при проведенні неруйнівного контролю прошарок між електродом і виробом повинен бути більше декількох десятків часток міліметра. Збільшувати площу ЄП більше 20...30 мм не доцільно з точки зору забезпечення технології контролю [10]. Тому наявність цих двох суперечливих умов приводить до того, що оптимальний діаметр обкладки ЄП повинен бути не більше 25–30 мм. Проте конкретну його величину потрібно визначати експериментально.

Аналіз формул (3–4) показує, що іншим шляхом підвищення чутливості ЄП є використання проміжних шарів матеріалу з високим значенням величини

відносної діелектричної проникності. Такий висновок підтверджується експериментальними даними, отриманими при дослідженні матеріалів з різною діелектричною проникністю [68, 82–84]. В табл. 1 наведена експериментальна залежність величини співвідношення амплітуд A ультразвукового імпульсу й завад при прийманні ЄП імпульсів, збуджених ПЕП на частоті 2,5 МГц, $h = 1$ мм.

Таблиця 1 – Залежність величини A співвідношення амплітуд ультразвукового імпульсу й перешкод при прийманні ЄП імпульсів ПЕП

Матеріал прошарку ЄП	Повітря	Лавсан	Папір 80 г/м ²	Спечений окис алюмінію	Гетинакс
A , дБ	7	20	30	32	42

Очевидно, що вибір матеріалу прошарку має принципове значення. Амплітуду корисного сигналу можливо підвищити у багато разів. При цьому посилюючий матеріал повинен одночасно відігравати роль захисної плівки, оскільки ЄП може бути ушкоджений під час сканування поверхні виробу, що контролюється. Тому при проведенні експериментів була використана лавсанова плівка товщиною 0,2 мм, яка одночасно є прошарком стійким до стирання. Однак, під час експериментальних досліджень установлено, що чутливість таких ЄП істотно змінюється в часі. Причиною цього ефекту є поступове накопичення об'ємного заряду (міграційна поляризація) [68], який створює зворотне електричне поле в діелектричному прошарку (наприклад, лавсановій плівці), що не дозволяє проводити неруйнівний контроль. Аналогічні результати отримано при використанні фторопластових плівок, слюди й ін. Різні заходи щодо попередньої підготовки діелектричних прошарків з різних матеріалів не приводять до зменшення нестабільності ЄП, як при прийманні акустичних імпульсів, так і під час їхнього збудження, рис. 3 (поляризуюча напруга 937 В, змінна напруга – 1000 В, прошарок між електродом і виробом – лавсанова плівка товщиною 0,2 мм, $\varepsilon = 3,2$ [73, 82–84]).

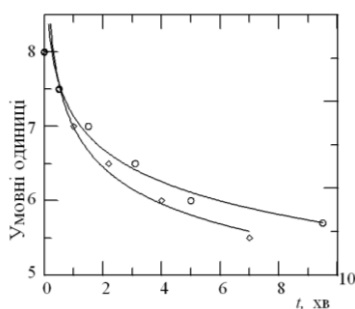


Рис. 3 – Залежність прийнятого (○) і збудженого (◇) ЄП сигналу від часу вимірювання

Для усунення такого недоліку й збереження підвищеної чутливості ЄП за рахунок використання посилюючих захисних прошарків з матеріалів з високою діелектричною проникністю використовують замість постійного поляризуючого

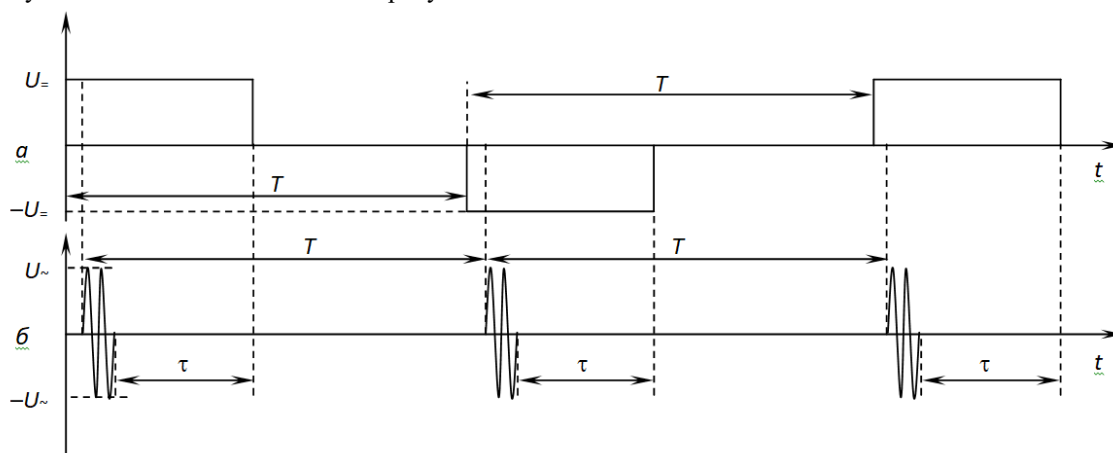


Рис. 4 – Форма поляризуючих імпульсів:

а - ефективного ЄП і б - високочастотних імпульсів збудження; T – період зондування ОК; – час, протягом якого приймають акустичні імпульси з ОК [85–86]

Важливою перевагою такого способу живлення ЄП є також те, що короткі поляризуючі імпульси за амплітудою можуть перевищувати постійну поляризуючу напругу без пробою посилюючої захисної діелектричної плівки. Це дає можливість додатково підвищити чутливість ЄП.

Чутливість такого перетворювача з урахуванням діелектричного h_2 й повітряного h_1 прошарків (який завжди є при дефектоскопії й товщинометрії) описується виразом [88]

$$\eta^{A\sim} = \frac{U_{\sim}}{A_{\sim}} = \varepsilon \cdot E \left/ \left(\varepsilon \cdot \frac{h_1}{h_2} + 1 \right) \right., \quad (5)$$

де $U_{\sim}$ – напруга на виході датчика, викликана зміщеннями часток матеріалу $A_{\sim}$ в акустичній хвилі; ε – відносна діелектрична проникність плівки (відносна діелектрична проникність повітря прийнята рівною 1); $E = U_{\sim} / h_2$ – електрична стійкість діелектричної захисної плівки; $U_{\sim}$ – величина поляризуючої напруги на обкладках ЄП.

Оскільки для прийнятих діелектричних плівок E становить близько 30 В/мкм, то елементарні розрахунки показують, що чутливість буде рівнятися $\approx 10^8$ В/м. Ця величина відрізняється від аналогічної

поля імпульсне – зі зміною полярності кожного наступного поляризуючого імпульсу, рис. 4 [85–86].

Результати експериментальної перевірки підтвердили, що при перемиканні полярності поляризуючих імпульсів, амплітуда прийнятих інформаційних сигналів залишається стабільною [85–86]. При цьому амплітуда сигналів на алюмінієвих зразках відносно до перешкод становить не менше 100 разів. Це достатня величина для проведення ультразвукової товщинометрії і навіть дефектоскопії.

Крім того, короткі (біля декількох сотень мікросекунд і частоті посилок (зондування виробу) таких імпульсів не більше 100 разів на секунду) імпульси високої напруги не мають помітної небезпечної дії на обслуговуючий персонал, як постійна напруга. З точки зору техніки безпеки це значна перевага.

для ПЕП на істотно меншу величину, ніж теоретично розраховану раніше [10–11].

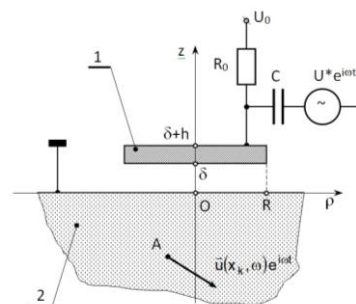


Рис. 5 – Розрахункова схема моделі перетворювача емнісного типу з дисковим електродом в режимі збудження ультразвукових хвиль [66]

Тому рядом авторів були додатково розглянуті теоретичні засади збудження та прийому ультразвукових імпульсів електростатичним способом [66–68, 89]. В цих роботах в загальному вигляді розглянута задача з математичного моделювання процесу збудження ультразвукових імпульсів гармонічним електричним полем згідно з рис. 5.

Електростатичне поле, яке створюється електрично зарядженим диском (рис. 5) в навколишньому повітряному просторі, можна описати за допомогою скалярного осесиметричного електричного потенціалу $\Phi^0(\rho, z)$, де ρ і z радіальна і осьова координати циліндричної системи координат ρ, φ, z з центром в точці О (рис. 5). Скалярний потенціал $\Phi^0(\rho, z)$ задовольняє рівнянню Пуассона [90]

$$\nabla^2 \Phi^0(\rho, z) = -\rho_e / \chi_0, \quad (6)$$

де ρ_e - об'ємна щільність статичного електричного заряду в металевому диску; $\chi_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ - діелектрична проникність навколишнього до диску простору.

Будемо вважати, що статичний електричний заряд в обсязі диска $V = \pi R^2 h$ (R - радіус диска, h - його товщина) розподілений рівномірно і тому

$$\rho_e = \frac{C_0 U_0}{\pi R^2 h} f(\rho) f(z), \quad (7)$$

де $C_0 \approx \pi R^2 \chi_0 / \delta$ - статична електрична ємність диска над поверхнею металевого виробу. Металевий зразок для спрощення подальших викладок замінимо півпростором $z \leq 0$ з ізотропною питомою електричну провідністю r з розмірністю сіменс, помножений на метр, і магнітною проникністю μ (розмірність - Генрі, поділений на метр). Функції $f(\rho)$ і $f(z)$ задаються наступним чином

$$f(\rho) = \begin{cases} 1 & \forall \rho \in [0, R], \\ 0 & \forall \rho \notin [0, R], \end{cases} \quad f(z) = \begin{cases} 1 & \forall z \in [\delta, \delta + h], \\ 0 & \forall z \notin [\delta, \delta + h]. \end{cases} \quad (8)$$

Оскільки в статичній ситуації електричний струм по поверхні не протікає, то радіальний компонент вектора напруженості статичного електричного поля на поверхні металу має дорівнювати нулю. В іншому випадку по поверхні металу протікав би електричний струм з поверхневою щільністю і статичний заряд в цьому випадку був би рівний нулю. Таким чином, рішення рівняння (6) на границі має задовольняти наступні умови

$$\left. \frac{\partial \Phi^0(\rho, z)}{\partial \rho} \right|_{z=0} = 0 \quad (9)$$

Крім цього, скалярний потенціал $\Phi^0(\rho, z)$ і його перші похідні $\partial \Phi^0(\rho, z) / \partial \rho$ і $\partial \Phi^0(\rho, z) / \partial z$ повинні задовольняти умові фізичної можливості бути реалізованим джерела поля, т. Е. Відповідати таким граничним умовам

$$\lim_{R_0 \rightarrow \infty} \left\{ R_0 \Phi^0(\rho, z), R_0 \frac{\partial \Phi^0(\rho, z)}{\partial \rho}, R_0 \frac{\partial \Phi^0(\rho, z)}{\partial z} \right\} = 0, \quad (10)$$

де $R_0 = \sqrt{\rho^2 + z^2}$ відстань від металевого диска.

Фізичний сенс умови (10) очевидний - джерело кінцевої потужності створює електричне поле,

потенціал якого і компоненти вектора напруженості зменшуються швидше, ніж $1/R_0$ та звертаються в нуль при нескінченному віддаленні від нього.

В результаті вирішення сформульованої задачі було отримано аналітичне рушення щодо збудження ультразвукових хвиль ємнісним способом.

Проте, задача з прийому ультразвукових хвиль ємнісним методом не вирішена.

Окрім того, у реальних вимірювальних схемах СП підключаються до підсилювачів, які мають вхідну ємність, що знижує чутливість перетворювача. Тому для досягнення максимальної чутливості необхідно зменшувати довжину з'єднувального кабелю й зменшувати вхідну ємність підсилювача.

Недостатньо даних з практичного використання ємнісного методу в режимі збудження і прийому ультразвукових коливань.

Необхідно проаналізувати інші способи збудження і прийому ультразвукових коливань безконтактним методом які б дали можливість проводити безконтактний контроль трубчатих, стрижневих та пластинчатих виробів.

Висновки

1. В результаті аналізу літературних джерел встановлена недоцільність контролю та діагностики трубчатих, стрижневих та пластинчатих виробів традиційним контактним методом.

2. Показано, що ефективно можливо виконувати контроль та діагностику трубчатих, стрижневих та пластинчатих виробів безконтактним методом без використання контактної рідини.

Список літератури

1. 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.
2. Троїцький В.А. Краткое пособие по контролю качества сварных соединений. - К.: ИЭС им. Е.О. Патона, 1997. - 224 с.
3. Сучков Г.М. Развитие теории и практики создания приборов для электромагнитно - акустического контроля металлоизделий / дис. д.т.н., 2005. Харьков. - 521 с.
4. Білокур І.П. Основи дефектоскопії: Підручник - К.: «Азимут-Україна», 2004. - 496 с.
5. Карпаш О.М. Неруйнівний контроль та технічна діагностика нафтогазового обладнання та інструменту // Методи та прилади контролю якості. - 1997. - № 1. - С. 22-24.
7. Сучков Г.М. Прилади і методи акустичного контролю: навч. пос. / Г.М. Сучков, К.Л. Ноздрачова, Е.В. Міщанчук, В.М. Єрошенков. - Харків: НТУ «ХП», 2011. - 220 с.
8. Цепенко В.К., Куц Ю.В. Основи ультразвукового неруйнівного контролю: Підручник. К.: НТУУ «КП». - 2010. - 448 с.
9. Маєвський С.М., Бабак В.П., Щербак Л.М. Основи побудови систем аналізу сигналів у неруйнівному контролі. - К.: Либідь, 1993. - 200 с.
10. Термінологічний словник з неруйнуючого контролю / І.П Білокур, О.С. Боровіков, В.В. Луб'янний. - К.: ІСДО, 1995. - 228 с.
11. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т.3: Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. - М.: Машиностроение, 2008. - 864 с.
12. Ермолов И. Н. Теория и практика ультразвукового контроля. - М: Машиностроение, 1981. - 240 с.
13. Неразрушающий контроль. В 5 кн. Кн. 2. Акустические методы контроля: Практ. пособие / И.Н. Ермолов, Н.П. Алешин, А.И. Потапов; Под ред. В.В. Сухорукова. - М.: Высш. шк., 1991. - 283 с.
14. Ультразвуковой контроль материалов: Справ. изд. Й. Крауткреммер, Г. Крауткреммер; Пер. с нем. - М.:

- Металлургия, 1991. – 752 с.
15. Гусев Е. А., Королев М. В., Карпельсон А. Е. и др. Приборы неразрушающего контроля толщины в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1993. – 144 с.
 16. Ультразвуковой контроль. Алешин Н.П., Клюев В.В., Бобров В.Т., Ланге Ю.В., Щербинский В.Г. Учебное пособие: учебное пособие для подготовки специалистов по неразрушающему контролю и технической диагностике / Под общей редакцией В. В. Клюева; Российское о-во по неразрушающему контролю и технической диагностике (РОНКТД). Москва, 2011. Серия Диагностика безопасности.
 17. Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник / В.В.Клюев, Ф.Р.Соснин, В.Н.Филипов и др. Под ред. В.В. Клюева. – М. Машиностроение, 1995. – 488 с.
 18. Аттестация персонала в области неразрушающего контроля. метрология в неразрушающем контроле Клюев С.В., Коновалов Н.Н., Копытов С.Г., Соловьева М.О., Муравская Н.П. под общей редакцией В.В. Клюева, Российское общество по неразрушающему контролю и технической диагностике (РОНКТД). Москва, 2011. Серия Диагностика Безопасности.
 19. А1208 -простой и сложный ультразвуковой толщиномер Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г., Козлов В. Н., Пастушков П.С., Алехин С.Г., Жуков А.В. В мире неразрушающего контроля. 2003. № 2. С. 38.
 20. Ермолов И.Н., Вопилкин А.Х., Бадалян В.Г. Расчеты в ультразвуковой дефектоскопии (краткий справочник). – М.: "ЭХО+", 2000. – 108 с.
 21. Ермолов И.Н., Зенкова Л.С. Исследование зеркально-теневых методов ультразвуковой дефектоскопии // Дефектоскопия. – 1976. – № 2. – С. 16–23.
 22. Ермолов И.Н. Дифракционно – временной метод контроля // В мире неразрушающего контроля. – 2001. – № 2. – С. 7–11.
 23. Дымкин Г.Я. Акустический тракт при эхоимпульсном контроле ограниченных протяженных изделий // Дефектоскопия. – 1990. – № 6. – С. 18–24.
 24. Баранов, В.М. Акустические измерения в ядерной энергетике. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 320 с.
 25. Белокуров, И.П. Дефектология и неразрушающий контроль: Учеб. пособие. — Киев: Вища шк, 1990: — 200 с.
 26. Гурвич А.К., Давыдкин А.В. Схемы прозвучивания и эффективность средств сплошного УЗК рельсов // В мире неразрушающего контроля. – 2003. – № 3. – С. 71–73.
 27. Колбин И. Б., Сучков Г. М. Разработка и совершенствование методики и технологической оснастки для проведения ультразвукового контроля цилиндрических изделий с использованием хордового способа // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2002. – № 1. - С. 39–42.
 28. Щербинский В.Г. Технология ультразвукового контроля сварных соединений. – М.: ЦНИИТМАШ, 2003. – 396 с.
 29. Сучков Г.М. О главном преимуществе ЭМА способа // Дефектоскопия. – Екатеринбург, 2000. – № 10.
 30. ГСТУ 32.2.04.001-2000. Дефектоскопи ультразвукові для контролю рейок при їх експлуатації. Технічні вимоги. / Зареєстр. 07. 09. 2000 р. Держ. ком. України по стандартизації, метрології та сертифікації. – Київ, 2000. – 16 с.
 31. ПНАЭ Г-7-030-91. Унифицированные методики контроля основных материалов (полуфабрикатов), сварных соединений и наплавки оборудования атомных энергетических установок. Ультразвуковой контроль. Часть II. Контроль сварных соединений и наплавки. – М.: ЦНИИатоминформ, 1992. – 157 с.
 32. Викторов И.А. Звуковые поверхностные волны в твердых телах. – М.: Наука, 1981. – 288 с.
 33. Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П. Теория волн. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 384 с.
 34. Бреховских Л.М., Годин О.А. Акустика слоистых сред. – М.: Наука, 1989. – 412 с.
 35. Сучков Г.М., Петрищев О.Н., Хомяк Ю.В. Теория и практика электромагнитно-акустического контроля. Часть 3. Методы и средства повышения чувствительности ультразвукового контроля ЭМА способом: монография. – Харьков: Изд-во «Щедра садиба плюс», 2015. – 124 с.
 36. Сучков Г.М., Петрищев О.Н., Глоба С.Н. Теория и практика электромагнитно-акустического контроля. Часть 4. Экспериментальные исследования возможностей ультразвукового контроля ЭМА способом: монография. – Харьков: Изд-во «Щедра садиба плюс», 2015. – 104 с.
 37. Мигущенко Р.П., Сучков Г.М., Петрищев О.Н., Десятниченко А.В. Теория и практика электромагнитно-акустического контроля. Часть 5. Особенности конструирования и практического применения ЭМА устройств ультразвукового контроля металлоизделий. Монография. Харьков: ТОВ «Планета-принт», 2016 – 230 с.
 38. Гольден А.Д. Ультразвуковой контроль резиноталлических конструкций волнами Лэмба при одностороннем доступе со стороны резины // Дефектоскопия. – 1993. – № 1. – С. 39–42.
 39. Перов Д.В. Определение геометрических параметров цилиндрических тел с использованием дисперсионных характеристик мод упругого цилиндрического волновода // Дефектоскопия. – 2000. – №5. – С. 21–30.
 40. Колбин И. Б., Сучков Г. М. Разработка и совершенствование методики и технологической оснастки для проведения ультразвукового контроля цилиндрических изделий с использованием хордового способа // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2002. – № 1. - С. 39–40.
 - Буденков, Г.А. Акустическая дефектоскопия прутков с использованием многократных отражений / Г.А. Буденков, О.В. Недзвежкая, Б.А. Буденков, Т.Н. Лебедева, Д.В. Злобин. — Дефектоскопия. — 2004. — №8. — С. 50–55.
 41. Буденков, Г.А. Взаимодействие крутильных волн с продольными трещинами труб / Г.А. Буденков, О.В. Недзвежкая, Д.В. Злобин, С.А. Мурашов // Дефектоскопия, 2006, №6. —С. 57-66.
 42. Лебедев А.А., Шарко А.В. Акустический контроль механических свойств стальных изделий поверхностными волнами Рэлея // Дефектоскопия. – 1990. – № 10. – С. 36–41.
 43. Abraham O. The use of surface waves for non-destructive testing of concrete structures // Insight. – 2000. – V. 42, № 7. – P. 444–446.
 44. ПНАЭ Г-7-014-89 ОСТ. Унифицированные методики контроля основных материалов (полуфабрикатов), сварных соединений и наплавки оборудования атомных энергетических установок. Ультразвуковой контроль. Часть I. Контроль основных материалов (полуфабрикатов). – М.: ЦНИИатоминформ, 1990. – 41 с.
 45. Grubin H.L. Direct electromagnetic generation of compressional waves in metals in static magnetic fields // IEEE Trans. – SU-17, 1970. – P. 227–229.
 46. Dickhaut E. Rechnergestützte Ultraschallprüfung von Turbinenscheiben // Jahrestag d. DGZfP Essen. – 1984. – Vortrag Nr 35. – P. 881–890.
 47. Wallace. W.D. Electromagnetic generation of ultrasound in metals // Int. Non Destr. Test. - 1971. – № 2. – P. 309–334.
 48. Кириков А.В., Забродин А.Н., Комлик А.В. Методы и средства ультразвукового контроля проката с применением электромагнитно – акустических преобразователей // В мире неразрушающего контроля. – 1999. – № 3. – С. 18–20.
 49. Cole P. The generation and reception of ultrasonic surface waves in mild steel, at high temperatures // Ultrasonics. – 1978. – № 4 (16). – P. 151–155.
 50. Moran T., Panos R. Electromagnetic generation of electronically steered ultrasonic bulk waves // Journ. Appl. Phys. – 1976. № 5 (47). – P. 2225.
 51. Whittington K.R. Ultrasonic testing at high temperatures // Phys. Techn. - 1978. - № 2. - P. 62 – 67.
 52. 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.
 53. Сучков Г.М. Новые методы ультразвукового контроля ЭМА способом на основе адаптации радиолокационных технологий// Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2005. – № 3. – С. 38-42.
 54. Aliouane S., Hassam M. Electromagnetic Acoustic Transducers (EMATs) / Design Evaluation of their Performances. 15-th WCNDT. Roma. 2000. – P. 334–341.
 55. Сучков Г.М. Исследование особенностей распространения упругих волн, возбуждаемых ЭМА способом // Контроль. Диагностика. – 2001. – № 12. – С. 36–39.
 56. Никифорова Ж. Г., Булавин А.Н., Ягер В. и др. УЗК трубопроводов с изоляционными покрытиями с применением ЭМА – преобразователей // В мире неразрушающего контроля. – 2004. – № 2. – С. 42–45.
 57. Руженцев И.В., Сучков Г.М., Марченко А.В. Электромагнитно-акустический способ измерений. Электромагнитно -

- акустические преобразователи // Радиотехника: Всеукр. міжведомственный н.-т. сб. Харьков: ХНУРЭ, 2004. – Вып. 136. – С. 62–66.
58. Домаркас В.И., Кажис Р.-И.Ю. Контрольно-измерительные пьезоэлектрические преобразователи. – Вильнюс: Минта, 1975. – 258 с.
 59. Ультразвуковые пьезопреобразователи для неразрушающего контроля / Под ред. И.Н. Ермолова. – М.: Машиностроение, 1986. – 280 с.
 60. Чабанов В.Е. Лазерный ультразвуковой контроль материалов. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1986. – 232 с.
 61. Чабанов В.Е. Термоупругое возбуждение акустических сигналов лазером в твердых телах со свободной границей // Дефектоскопия. – 1995. – № 7. – С. 25–33.
 62. Гуревич С.Ю., Петров Ю.В., Шульгинов А.А., Прокопьев К.В. О границах механизмов термоакустического преобразования при лазерной генерации ультразвука в металлах // Дефектоскопия. – 2001. – №4. – С. 69–75.
 63. Кондратьев А.И., Луговой В.А. Датчик акустических сигналов для высокоточных измерений // Дефектоскопия. – 1990. – №3. – С. 30–38.
 64. О возбуждении ультразвуковых волн в металлах емкостным преобразователем. Часть 1/ Сучков Г.М., Петрищев О.Н., Ноздрачева Е.Л., Карпусь В.В. // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – Киев. – 2015 – № 2
 65. Забродин А.Н., Малинка С.А. Применение лазеров в промышленных системах автоматизированного УЗК проката и труб // В мире неразрушающего контроля. 2004. – №3. – С. 11–13.
 66. Ноздрачева К.Л., Сучков Г.М., Петрищев О.Н., Романок М.И. О возбуждении ультразвуковых волн в металлах емкостным преобразователем. Часть 1 // Техническая диагностика и неразрушающий контроль, 2015, №1, с. 45–50.
 67. Мигущенко Р.П., Сучков Г.М., Петрищев О.Н., Ноздрачева Е.Л. Модель ультразвуковых электроакустических приемных преобразователей ультразвуковых волн Релея // Техническая электродинамика. – 2016. – № 6. – С. 83–89
 68. Ноздрачева Е.Л., Сучков Г.М., Петрищев О.Н. Особенности возбуждения ультразвуковых импульсов емкостным преобразователем // Наукові праці Донецького національного технічного університету, серія: «Обчислювальна техніка та автоматизація», 2015, с.165–171
 69. Дробот Ю.В. Возбуждение коротких упругих импульсов емкостным методом / Ю.В. Дробот, А.И. Кондратьев, В.А. Луговой // Дефектоскопия. – 1983. – №3. – С.35–37.
 70. Кондратьев А.И. Датчик акустических сигналов для высокоточных измерений/ А.И. Кондратьев, В.А. Луговой // Дефектоскопия. – 1990. – № 3. – С. 30–38.
 71. Кондратьев А.И., Луговой В.А. Измерение скорости и затухания Рэлея-волн емкостным преобразователем / А.И. Кондратьев, В.А. Луговой // Измерительная техника. – 1991. – №5. – С. 43–44.
 72. Измерение скорости распространения и коэффициента затухания продольных волн в тонких образцах /А. И. Кондратьев, А. А. Кондратьев, В. И. Римлянд, К. А. Драчев // Вестник ТОГУ. 2013. № 4(31). – С. 17–24
 73. Безконтактний емнісний спосіб збудження і прийому пружних хвиль / Сучков Г.М., Ноздрачева К.Л. // Методи та прилади контролю якості. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2013. – № 2(31). – С. 3–6
 74. Сучков Г.М. Энерго- и ресурсосберегающие приборы и технологии неразрушающего контроля / Г.М. Сучков, С.А. Алексеев, В.В. Захаренко // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – Киев, 2006. – № 4. С. 29–34.
 75. Глебова Л.В., Сучков Г.М., Петрищев О.М., Глоба С.М. Патент на корисну модель №UA72010. G01N29/34. Заявка №u201112741/ Опубл. 10.08.2012. Бюл. №15. – 3 с.
 76. Сучков Г.М., Глоба С.Н., Глебова Л.В. Возможность приема ультразвуковых импульсов преобразователями емкостного типа. – Вісник Нац. техн. ун-ту «Харківський політехнічний інститут». - Харків: НТУ «ХПІ», 2007, № 35, – С. 29–32.
 77. Boler F.M., Spetzer H.A., Getting I.C. Capacitance transducer with point like probe for receiving acoustic emissions // Rev. Sci. Instrum – 1984. – 55. – N 8 – P.1293–1297.
 78. Ким К.Ю. Самоустанавливающийся емкостной датчик для регистрации широкополосных ультразвуковых сигналов смещения / К.Ю. Ким, В. Сакс // Приборы для научных исследований. – 1986. – №2. – С. 133–136.
 79. Луговой В.А. Высокостабильный емкостной преобразователь ультразвуковых сигналов / В.А. Луговой, В.П. Троценко // Приборы и техника экспериментов. – 1986. – № 3. – С. 194–195.
 80. Сучков Г.М. Работы НТУ «Харьковский политехнический институт» / Сучков Г.М., Тюпа И.В., Хомяк Ю.В., Ноздрачева Е.Л., Глебова Л.В. // VII Международная конференция «Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности» 11–13 марта 2008 г., Тезисы докладов – СК «Олимпийский». Москва, 2008 г. – С.191–193.
 81. Глебова Л.В. Макет засобу для збудження і прийому ультразвукових імпульсів емнісним способом / Глебова Л.В., Сучков Г.М. // II Університетська науково-практична студентська конференція магістрів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» 25–27 березня 2008 р., Тези доповідей – НТУ «ХПІ». Харків, 2008 р. – С.50–52.
 82. Сучков Г.М. Дослідження прийому акустичних імпульсів емнісним способом / Сучков Г.М., Донченко А.В., Глебова Л.В. // VII Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування 2008: стан і перспективи» 22–23 квітня 2008 р., Збірник тез доповідей – НТУУ «КПІ». Київ, 2008 р. – С. 217–218.
 83. Сучков Г.М. Дослідження прийому акустичних імпульсів емнісним способом / Сучков Г.М., Донченко А.В., Глебова Л.В. // Перша студентська науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» 23 квітня 2008 р., Тези доповідей – НТУУ «КПІ». Київ, 2008 р. – С.94–95.
 84. Сучков Г.М. Дослідження факторів, які впливають на збудження акустичних імпульсів емнісним способом. / Сучков Г.М., Глебова Л.В. // Вестник НТУ «ХПІ»: Тематический выпуск "Приборы и методы контроля и определения состава вещества" – 2008. – №48. – С. 116–123.
 85. Сучков Г.М. Збудження ультразвукових імпульсів емнісним способом / Сучков Г.М., Глебова Л.В. // XVI Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» 4–6 червня 2008 р., Збірник тез доповідей – НТУ «ХПІ». Харків, 2008. – С.442.
 86. Глебова Л.В. Емкостные методы неразрушающего контроля / Глебова Л.В., Сучков Г.М. // III Університетська науково-практична студентська конференція магістрів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» 14–16 квітня 2009 р., Тези доповідей Частина 2 – НТУ «ХПІ». Харків, 2009 р. – С.170–172.
 87. Глебова Л.В. Возбуждение ультразвуковых колебаний емкостным преобразователем. / Глебова Л.В., Тюпа И.В., Григорьев А.Л., Глоба С.Н. // Вестник НТУ «ХПІ»: Сборник научных трудов "Электроэнергетика и преобразовательная техника" – 2010. – №12. – С. 192–195.
 88. Сучков Г.М. Теоретичні дослідження ультразвукового емнісного перетворювача / Сучков Г.М., Глоба С.М., Глебова Л.В. // IX Міжнародна науково-технічна конференція «ПРИЛАДОБУДУВАННЯ 2010: стан і перспективи» 27–28 квітня 2010 р., Збірник тез доповідей – НТУУ «КПІ». Київ, 2010 р. – С. 216–217.
 89. Григорьев А.Л. Математическая модель емкостного метода возбуждения колебаний в упругих средах. / Григорьев А.Л., Тюпа И.В., Глебова Л.В. // Вісник НТУ «ХПІ»: Тематичний випуск "Математичне моделювання в техніці та технологіях" – 2010. – №68. – С.38–51.
 90. Смирнов В. И. Курс высшей математики. Том III. Часть 2. – М.: Наука, 1974. – 672 с.

Bibliography (transliterated)

1. Paton B. E., Troyitskiy V. O., Posipayko Yu. M. Neruyivnyi kontrol v Ukraini [Nondestructive testing in Ukraine] // Inform. byul. Ukrainskogo tovaristva neruyivnogo kontrolyu ta tehničnoy diagnostiki. –2003. – No 2(18). – P. 5–9.
2. Troitskiy V.A. Kratkoe posobie po kontrolyu kachestva svarnyih soedineniy [Abridged guide to welded connections quality testing]. – Kyiv: IES im. E.O. Patona, 1997. – 224 p.
3. Suchkov G.M. Razvitie teorii i praktiki sozdaniya priborov dlya elektromagnitno – akusticheskogo kontrolya metalloizdeliy [Development of theory and practice of electromagnetic-acoustic device development for metal product testing] / dis. d.t.n., 2005. Kharkiv. – 521 p.
4. Bilokur I.P. Osnovi defektoskopiyi: Pidruchnik [Fundamentals of

- Defectoscopy: Textbook*] – Kyiv: «Azimut-Ukrayina», 2004. – 496 p.
5. Karpash O.M. Neruynivniy kontrol ta tehnicna diagnostika naftogazovogo obladnannya ta instrumentu [*Non-destructive testing and technical diagnostics of oil and gas equipment and tools*] // Metodi ta priladi kontrolyu yakosti. – 1997. – No 1. – P. 22–24.
 6. Suchkov G.M. Priladi i metodi akustichnogo kontrolyu: navch. pos. [*Instruments and mats of acoustic control*] / G.M. Suchkov, K.L. Nozdrachova, E.V. Mischanchuk, V.M. Eroschenkov. – Harkiv: NTU «HPI», 2011. – 220 p.
 7. Tsapenko V.K., Kuts Yu.V. Osnovi ultrazvukovogo neruynivnogo kontrolyu: Pidruchnik. [*Fundamentals of Ultrasonic Nondestructive Control: Textbook*] Kyiv: NTUU «KPI». – 2010. – 448 p.
 8. MaEvskiy S.M., Babak V.P., Scherbak L.M. Osnovi pobudovi sistem analizu signaliv u neruynivnomu kontroli [*Fundamentals of construction of signal analysis systems in non-destructive control*]. – Kyiv: Libid, 1993. – 200 p.
 9. Terminologichnyi slovník z neruynuyuchogo kontrolyu [*Terminological dictionary on non-destructive testing*] / I.P. Bilokur, O.S. Borovikov, V.V. Lub'yany. – Kyiv: iSDO, 1995. – 228 p.
 10. Nerazrushayuschiy kontrol: Spravochnik: in 7 vol. Ed. V.V. Klyuev. V.3: Ultrazvukovoy kontrol [*Nondestructive testing: Handbook: in 7 volumes. Ed. V.V. Klyuev*] / I.N. Ermolov, Yu.V. Lange. – Moscow: Mashinostroenie, 2008. – 864 p.
 11. Ermolov I. N. Teoriya i praktika ultrazvukovogo kontrolya [*Theory and practice of ultrasonic testing*]. – Moscow: Mashinostroenie, 1981. – 240 P.
 12. Nerazrushayuschiy kontrol. In 5 books Book 2. Akusticheskie metody kontrolya: Prakt. Posobie [*Nondestructive testing. in 5 bks. V. 2. Acoustic testing methods*] / I.N. Ermolov, N.P. Aleshin, A.I. Potapov; Pod red. V.V. Suhorukova. – Moscow: Vyssh. shk., 1991. – 283 p.
 13. Ultrazvukovoy kontrol materialov: Sprav. izd. [*Ultrasonic inspection of materials*] Y. Krautkremmer, G. Krautkremmer; Tr. from German. – Moscow: Metallurgiya, 1991. – 752 P.
 14. Gusev E. A., Korolev M. V., Karpelson A. E. i dr. Pribory nerazrushayushego kontrolya tolschiniy v mashinostroenii [*Instruments for non-destructive testing of thickness in mechanical engineering*]. – Moscow: Mashinostroenie, 1993. – 144 P.
 15. Ultrazvukovoy kontrol [*Textbook: a training manual for training specialists in nondestructive testing and technical diagnostics*]. Aleshin N.P., Klyuev V.V., Bobrov V.T., Lange Yu.V., Scherbinskiy V.G. Uchebnoe posobie: uchebnoe posobie dlya podgotovki spetsialistov po nerazrushayuschemu kontrolyu i tehnichekskoy diagnostike / Pod obschey redaktsiyey V. V. Klyueva ; Rossiyskoe o-vo po nerazrushayuschemu kontrolyu i tehnichekskoy diagnostike (RONKTD). Moskow, 2011. Seriya Diagnostika bezopasnosti.
 16. Nerazrushayuschiy kontrol i diagnostika. Spravochnik [*Non-destructive testing and diagnostics. Directory*] / V.V.Klyuev, F.R.Sosnin, V.N.Filipov i dr. Pod red. V.V. Klyueva. – Moscow: Mashinostroenie, 1995. – 488 p.
 17. Attestatsiya personala v oblasti nerazrushayushego kontrolya. metrologiya v nerazrushayuschem kontrole [*Certification of personnel in the field of nondestructive testing. metrology in nondestructive testing*] Klyuev S.V., Konovalov N.N., Kopyitov S.G., Soloveva M.O., Muravskaya N.P. pod obschey redaktsiyey V.V. Klyueva, Rossiyskoe obschestvo po nerazrushayuschemu kontrolyu i tehnichekskoy diagnostike (RONKTD). Moskow, 2011. Seriya Diagnostika Bezopasnosti.
 18. A1208 -prostoy i slozhniy ultrazvukovoy tolschinomer [*A1208 - simple and complex ultrasonic thickness gauge*] Samokrutov A.A., Shevaldykin V.G., Kozlov V. N., Pastushkov P.S., Alehin S.G., Zhukov A.V. V mire nerazrushayushego kontrolya. 2003. No 2. P. 38.
 19. Ermolov I.N., Vopilkin A.H., Badalyan V.G. Raschetyi v ultrazvukovoy defektoskopii (kratkiy spravochnik) [*Calculations in ultrasonic flaw detection (short reference book)*]. – Moscow: "EHO", 2000. – 108 p.
 20. Ermolov I.N., Zenkova L.S. issledovanie zerkalno-tenevogo metoda ultrazvukovoy defektoskopii [*investigation of the mirror-shadow method of ultrasonic flaw detection*] // Defektoskopiya. – 1976. – No 2. – P. 16–23.
 21. Ermolov I.N. Difraktsionno – vremennoy metod kontrolya [*Diffraction-time control method*] // V mire nerazrushayushego kontrolya. – 2001. – No 2. – P. 7–11.
 22. Dyimkin G.Ya. Akusticheskiy trakt pri ehoimpulsnom kontrole ograniichennykh protyazhennykh izdeliy [*Acoustic path with echo impulse control of limited long products*] // Defektoskopiya. – 1990. – No 6. – P. 18–24.
 23. Baranov, V.M. Akusticheskie izmereniya v yadernoy energetike [*Acoustic measurements in nuclear power engineering*]. – Moscow: Energo-atomizdat, 1990. – 320 p.
 24. Belokurov, I.P. Defektologiya i nerazrushayuschiy kontrol: Ucheb. Posobie [*Defectology and Nondestructive Testing: Proc. allowance*]. – Kiev: Vischa shk, 1990: – 200 p.
 25. Gurvich A.K., Davyidkin A.V. Shemyi prozvuchivaniya i effektivnost sredstv sploshnogo UZK relsov [*Schemes of sounding and efficiency of means of continuous ultrasonic testing of rails*] // V mire nerazrushayushego kontrolya. – 2003. – No 3. – P. 71–73.
 26. Kolbin I. B., Suchkov G. M. Razrabotka i sovershenstvovanie metodiki i tehnologicheskoy osnastki dlya provedeniya ultrazvukovogo kontrolya tsilindricheskikh izdeliy s ispolzovaniem hordovogo sposoba [*Development and improvement of methods and technological equipment for ultrasonic testing of cylindrical products using the chord method*] // Tehnicheskaya diagnostika i nerazrushayuschiy kontrol. – 2002. – No 1. P. 39–42.
 27. Scherbinskiy V.G. Tehnologiya ultrazvukovogo kontrolya svarnykh soedineniy [*Technology of ultrasonic testing of welded joints*]. – Moscow: TsNiiTMASh, 2003. – 396 p.
 28. Suchkov G.M. O glavnom preimushchestve EMA sposoba [*The main advantage of the EMA method*] // Defektoskopiya. – Ekaterinburg, 2000. – No 10.
 29. GSTU 32.2.04.001-2000. Defektoskopiya ultrazvukovi dlya kontrolyu reyok pri yih ekspluatatsiyi. Tehnichni vimogi. [GSTU 32.2.04.001-2000. Ultrasonic defectoscopes for monitoring rails during their operation. Technical requirements] / Zareestr. 07.09.2000 r. Derzh. kom. Ukraini po standartizatsiyi, metrologiyi ta sertifikatsiyi. – Kyiv, 2000. – 16 p.
 30. PNAE G-7-030-91. Unifitsirovannyye metodiki kontrolya osnovnykh materialov (polufabrikatov), svarnykh soedineniy i naplavki oborudovaniya atomnykh energeticheskikh ustanovok. Ultrazvukovoy kontrol. Chast II. Kontrol svarnykh soedineniy i naplavki [*Unified methods for controlling basic materials (semi-finished products), welded joints and surfacing equipment for nuclear power plants. Ultrasonic inspection. Part II. inspection of welded joints and surfacing*]. – Moscow: TsNiiatominform, 1992. – 157 p.
 31. Viktorov I.A. Zvukovyye poverkhnostnyye volny v tverdykh telakh [*Sound Surface Waves in Solids*]. – Moscow: Nauka, 1981. – 288 P.
 32. Vinogradova M.B., Rudenko O.V., Suhorukov A.P. Teoriya voln [*Theory of waves*]. – Moscow: Nauka. Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury, 1979. – 384 P.
 33. Brehovskikh L.M., Godin O.A. Akustika sloistykh sred [*Acoustics of layered media*]. – Moscow: Nauka, 1989. – 412 p.
 34. Suchkov G.M., Petrishev O.N., Homyak Yu.V. Teoriya i praktika elektromagnitno-akusticheskogo kontrolya. Chast 3. Metody i sredstva povysheniya chuvstvitelnosti ultrazvukovogo kontrolya EMA sposobom: monografiya [*Theory and practice of electromagnetic-acoustic control. Part 3. Methods and means of increasing the sensitivity of ultrasonic monitoring of the EMA method: monograph*]. – Kharkiv: «Schedra sadiba plyus», 2015. – 124 p.
 35. Suchkov G.M., Petrishev O.N., Globa S.N. Teoriya i praktika elektromagnitno-akusticheskogo kontrolya. Chast 4. Eksperimentalnyye issledovaniya vozmozhnostey ultrazvukovogo kontrolya EMA sposobom: monografiya [*Theory and practice of electromagnetic-acoustic control. Part 4. Experimental studies of the possibilities of ultrasonic monitoring of the EMA method: monograph*]. – Kharkiv: «Schedra sadiba plyus», 2015. – 104 p.
 36. Migushchenko R.P., Suchkov G.M., Petrishev O.N., Desyatnichenko A.V. Teoriya i praktika elektromagnitno-akusticheskogo kontrolya. Chast 5. Osobennosti konstruirovaniya i prakticheskogo primeneniya EMA ustroystv ultrazvukovogo kontrolya metalloizdeliy. Monografiya. [*Theory and practice of electromagnetic-acoustic control. Part 5. Features of designing and practical application of EMA devices for ultrasonic inspection of metal products. Monograph*] Kharkiv: TOV «Planeta-print», 2016 – 230 p.
 37. Golden A.D. Ultrazvukovoy kontrol rezinometallicheskiy konstruktivnykh volnami Lemba pri odnostonnom dostupe so storony rezinyi [*Ultrasonic inspection of rubber-metal constructions by Lamb waves with unilateral access from rubber*] // Defektoskopiya. – 1993. – No 1. – P. 39–42.

38. Perov D.V. Opredelenie geometricheskikh parametrov tsilindricheskikh tel s ispolzovaniem dispersionnykh harakteristik mod uprugogo tsilindricheskogo volnovoda [Determination of the geometric parameters of cylindrical bodies using the dispersion characteristics of the modes of an elastic cylindrical waveguide] // Defektoskopiya. – 2000. – No 5. – P. 21–30.
39. Kolbin I. B., Suchkov G. M. Razrabotka i sovershenstvovanie metodiki i tehnologicheskoy osnastki dlya provedeniya ultrazvukovogo kontrolya tsilindricheskikh izdeliy s ispolzovaniem hordovogo sposoba [Development and improvement of methods and technological equipment for ultrasonic testing of cylindrical products using the chord method] // Tehnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchiy kontrol. – 2002. – No 1.
40. Budenkov, G.A. Akusticheskaya defektoskopiya prutkov s ispolzovaniem mnogokratnykh otrazheniy [Acoustic defectoscopy of rods using multiple reflections] / G.A. Budenkov, O.V. Nedzvetskaya, B.A. Budenkov, T.N. Lebedeva, D.V. Zlobin. — Defektoskopiya. — 2004. — No 8. — P. 50–55.
41. Budenkov, G.A. Vzaimodeystvie krutilnykh voln s prodolnymi treschinami trub [interaction of torsional waves with longitudinal cracks in pipes] / G.A. Budenkov, O.V. Nedzvetskaya, D.V. Zlobin, S.A. Murashov // Defektoskopiya, 2006, No 6. — P. 36–41.
42. Lebedev A.A., Sharko A.V. Akusticheskii kontrol mekhanicheskikh svoystv stalnykh izdeliy poverkhnostnyimi volnami Releya [Acoustic control of the mechanical properties of steel products by surface Rayleigh waves] // Defektoskopiya. – 1990. – No 10. – P. 36–41.
43. Abraham O. The use of surface waves for non-destructive testing of concrete structures // Insight. – 2000. – V. 42, No 7. – P. 444–446.
44. PNAE G-7-014-89 OST. Unifitsirovannyye metodiki kontrolya osnovnykh materialov (polufabrikatov), svarnykh soedineniy i naplavki oborudovaniya atomnykh energeticheskikh ustanovok. Ultrazvukovoy kontrol. Chast 1. Kontrol osnovnykh materialov (polufabrikatov) [Unified methods for controlling basic materials (semi-finished products), welded joints and surfacing equipment for nuclear power plants. Ultrasonic inspection. Part 1. Control of basic materials (semi-finished products)]. – Moscow: TsNiatominform, 1990. – 41 p.
45. Grubin H.L. Direct electromagnetic generation of compressional waves in metals in static magnetic fields [Direct electromagnetic generation of compressional waves in metals] // IEEE Trans. – SU-17, 1970. – P. 227–229.
46. Dickhaut E. Rechnergestutzte Ultraschallprufung von Turbinenscheiben [Rechnergestutzte Ultraschallprufung von Turbinenscheiben] // Jahrestag d. DGZfP Essen. – 1984. – Vortrag Nr 35. – P. 881–890.
47. Wallace, W.D. Electromagnetic generation of ultrasound in metals [Electromagnetic generation of ultrasound in metals] // int. Non Destr. Test. - 1971. – No 2. – P. 309–334.
48. Kirikov A.V., Zbrodin A.N., Komlik A.V. Metody i sredstva ultrazvukovogo kontrolya prokata s primeneniem elektromagnitno – akusticheskikh preobrazovateley [Methods and means of ultrasonic inspection of rolled metal with the use of electromagnetic-acoustic transducers] // V mire nerazrushayushchego kontrolya. – 1999. – No 3. – P. 18–20.
49. Cole P. The generation and reception of ultrasonic surface waves in mild steel, at high temperatures // Ultrasonics. – 1978. – No 4 (16). – P. 151–155.
50. Mogan T., Ranos R. Electromagnetic generation of electronically steered ultrasonic bulk waves // Journ. Appl. Phys. – 1976. No 5 (47). – P. 2225.
51. Whittington K.R. Ultrasonic testing at high temperatures // Phys. Techn. - 1978. - No 2. - P. 62–67.
52. Viskov O.V. Pidvischennya virogidnosti ta informativnosti akusticheskogo kontrolyu trubnih virobiv : Avtoref. kand. dis. [increase of probability and informativeness of acoustic control of pipe products: Author's abstract. Cand. Dis] Ivano-Frankivsk: ivano-Frankivskiy natsionalniy tehniichniy universitet nafti i gazu, 2003. – 20 p.
53. Suchkov G.M. Novyye metody ultrazvukovogo kontrolya EMA sposobom na osnove adaptatsii radiolokatsionnykh tehnologiy [New methods of ultrasonic control of the EMA method based on the adaptation of radar technologies] // Tehnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchiy kontrol. – 2005. – No 3. – P. 38–42.
54. Aliouane S., Hassam M. Electromagnetic Acoustic Transducers (EMATs) / Design Evaluation of their Performances. 15-th WCNDT. Roma. 2000. – P. 334–341.
55. Suchkov G.M. issledovanie osobennostey rasprostraneniya uprugikh voln, vzbuzhdaemykh EMA sposobom [investigation of the propagation of elastic waves excited by the EMA method] // Kontrol. Diagnostika. – 2001. – No 12. – P. 36–39.
56. Nikiforenko Zh. G., Bulavin A.N., Yager V. i dr. UZK truboprovodov s izolyatsionnymi pokrytiyami s primeneniem EMA – preobrazovateley [Ultrasonic testing of pipelines with insulating coatings using EMA converters] // V mire nerazrushayushchego kontrolya. – 2004. – No 2. – P. 42–45.
57. Ruzhentshev I.V., Suchkov G.M., Marchenko A.V. Elektromagnitno-akusticheskii sposob izmereniy. Elektromagnitno - akusticheskie preobrazovateli [Electromagnetic-acoustic method of measurements. Electromagnetic-acoustic transducers] // Radiotekhnika: Vseukr. mezhdomstvennyy n.-t. sb. Kharkiv: HNURE, 2004. – Vyip. 136. – P. 62–66.
58. Domarkas V.I., Kazhis R.-I.Yu. Kontrolno-izmeritelnyye pezoelektricheskie preobrazovateli [Control and measuring piezoelectric transducers.]. – Vilnyus: Mintas, 1975. – 258 p.
59. Ultrazvukovyye pezo-preobrazovateli dlya nerazrushayushchego kontrolya [Ultrasonic piezoelectric transducers for non-destructive testing] / Pod red. I.N. Ermolova. – Moscow: Mashinostroenie, 1986. – 280 p.
60. Chabanov V.E. Lazernyy ultrazvukovoy kontrol materialov [Laser ultrasonic inspection of materials]. – L.: LGU, 1986. – 232P.
61. Chabanov V.E. Termouprugoe vzbuzhdenie akusticheskikh signalov lazerom v tverdykh telakh so svobodnoy granitse [Thermoelastic excitation of acoustic signals by a laser in solids with a free boundary] // Defektoskopiya. – 1995. – No 7. – P. 25–33.
62. Gurevich S.Yu., Petrov Yu.V., Shulginov A.A., Prokopen K.V. O granitsah mekhanizmov termoakusticheskogo preobrazovaniya pri lazernoy generatsii ultrazvuka v metallakh [On the boundaries of the mechanisms of thermoacoustic transformation during laser generation of ultrasound in metals] // Defektoskopiya. – 2001. – No 4. – P. 69–75.
63. Kondratev A.I., Lugovoy V.A. Datchik akusticheskikh signalov dlya vyisokotochnykh izmereniy [Acoustic signal sensor for high-precision measurements] // Defektoskopiya. – 1990. – No 3. – P. 30–38.
64. vzbuzhdenii ultrazvukovykh voln v metallakh emkostnyim preobrazovatelem. Chast 1 [On the excitation of ultrasonic waves in metals by a capacitive converter. Part 1] / Suchkov G.M., Petrishev O.N., Nozdracheva E.L., Karpus V.V. // Tehnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchiy kontrol. – Kiev. – 2015. – No 2
65. Zbrodin A.N., Malinka S.A. Primenenie lazerov v promyshlennyykh sistemah avtomatizirovannogo UZK prokata i trub [Application of lasers in industrial systems of automated ultrasonic rolling and pipes] // V mire nerazrushayushchego kontrolya. 2004. - No 3. – P.11–13.
66. Nozdracheva K.L., Suchkov G.M., Petrishev O.N., Romanyuk M.I. O vzbuzhdenii ultrazvukovykh voln v metallakh emkostnyim preobrazovatelem. Chast1 [On the excitation of ultrasonic waves in metals by a capacitive converter. Part 1] // Tehnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchiy kontrol, 2015, No 1, P. 45–50.
67. Migushenko R.P., Suchkov G.M., Petrishev O.N., Nozdrachova E.L. Model ultrazvukovykh elektromekhanicheskikh priemnykh preobrazovateley ultrazvukovykh voln Releya [Model of ultrasonic electromechanical receiving transducers of ultrasonic waves of Rayleigh] // Tehnichna elektrodinamika. - 2016. - No 6. – P. 83–89
68. Nozdracheva E.L., Suchkov G.M., Petrishev O.N. Osobennosti vzbuzhdeniya ultrazvukovykh impulsiv emkostnyim preobrazovatelem [Features of excitation of ultrasonic pulses by a capacitive converter] // Naukovi pratsi Donetskogo natsionalnogo tehniichnogo universitetu, seriya: «Obchislyvalna tehnika ta avtomatizatsiya», 2015, P.165–171.
69. Drobot Yu.V. Vzbuzhdenie korotkikh uprugikh impulsiv emkostnyim metodom / Yu.V. Drobot, A.I. Kondratev, V.A. Lugovoy [Excitation of short elastic pulses by the capacitive method] // Defektoskopiya. – 1983. – No 3. – P.35–37.
70. Kondratev A.I. Datchik akusticheskikh signalov dlya vyisokotochnykh izmereniy/ A.I. Kondratev, V.A. Lugovoy [Acoustic signal sensor for high-precision measurements] // Defektoskopiya. – 1990. – No 3. – P. 30–38.
71. Kondratev A.I., Lugovoy V.A. izmerenie skorosti i zatuhaniya Releevskikh voln emkostnyim preobrazovatelem [Measuring the velocity and damping of Rayleigh waves by a capacitive converter] / A.I. Kondratev, V.A. Lugovoy // izmeritelnaya tehnika. – 1991. – No 5. – P. 43–44.

72. izmerenie skorosti rasprostraneniya i koeffitsienta zatushaniya prodolnykh voln v tonkih obraztsakh [Measurement of the propagation velocity and the attenuation coefficient of longitudinal waves in thin samples] / A. I. Kondratev, A. A. Kondratev, V. I. Rimlyand, K. A. Drachyov // Vestnik TOGU. 2013. No 4(31). – P. 17-24
73. Bezkontaktniy Emnisniy sposib zbudzhennya i priyomu pruzhnykh hvil / Suchkov G.M., Nozdrachova K.L. // Metodi ta priladi kontrolyu yakosti [Contactless volume method of excitation and receive of elastic waves]. – ivano-Frankivsk: iFNTUNG, 2013. – No 2(31). – P. 3-6
74. Suchkov G.M. Energo- i resursosberegayushchie pribory i tehnologii nerazrushayushchego kontrolya / G.M. Suchkov, E.A. Alekseev, V.V. Zaharenko [Energy and resource-saving devices and technologies of nondestructive testing] // Tehnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchiy kontrol. – Kiev, 2006. – No 4. – P. 29-34.
75. GLEBOVA L.V., SUCHKOV G.M., PETRISCHEV O.M., GLOBA S.M. Patent na korisnu model No UA72010. G01N29/34. Zayavka No u201112741 / Opubl. 10.08.2012. Byul. No 15. - 3 P.
76. Suchkov G.M., Globa S.N., Glebova L.V. Vozmozhnost priema ultrazvukovykh impulsiv preobrazovatelyami emkostnogo tipa [The possibility of receiving ultrasonic pulses by capacitive type converters]. – Visnik Nats. tehn. un-tu «Harkivskiy politekhnichniy institut». - Harkiv: NTU «HPI», 2007, No 35, – P. 29-32.
77. Boler F.M., Spetzler H.A., Getting I.C. Capacitance transducer with point like probe for receiving acoustic emissions // Rev. Sci. instrum – 1984. – 55. – N 8 – R.1293-1297.
78. Kim K.Yu. Samoustavlivayushchisya emkostnoy datchik dlya registratsii shirokopolosnykh ultrazvukovykh signalov smescheniya / K.yu. Kim, V. Saks [Self-Mounting Capacitive Sensor for Detection of Broadband Ultrasonic Offset Signals] // Pribory dlya nauchnykh issledovaniy. – 1986. – No 2. – P. 133-136.
79. Lugovoy V.A. Vysokostabilnyy emkostnoy preobrazovatel ultrazvukovykh signalov [Highly stable capacitive ultrasonic transducer] / V.A. Lugovoy, V.P. Trotsenko // Pribory i tehnika eksperimentov. – 1986. – No 3. – P. 194-195.
80. Suchkov G.M. Raboty NTU «Kharkivskiy politekhnicheskii institut» / Suchkov G.M., Tyupa I.V., Homyak Yu.V., Nozdracheva E.L., Glebova L.V. // VII Mezhdunarodnaya konferentsiya «Nerazrushayushchiy kontrol i tehnikeskaya diagnostika v promyshlennosti» [VII international Conference "Non-Destructive Testing and Technical Diagnostics in industry"] 11-13 marta 2008 g., Tezisy dokladov – SK «Olimpiyskiy». : Moscow, 2008 g. – P.191-193.
81. Glebova L.V. Maket zasobu dlya zbudzhennya i priyomu ultrazvukovykh impulsiv Emnisnim sposobom / Glebova L.V., Suchkov G.M. [Layout of a means for excitation and reception of ultrasonic pulses in a capacitive way] // II Universitetska naukovo-praktichna studentska konferentsiya magistrantiv Natsionalnogo tekhnicheskogo universitetu «Harkivskiy politekhnichniy institut» 25-27 bereznya 2008 r., Tezi dopovidey – NTU «HPI». : KHarkiv, 2008 r. – P.50-52.
82. Suchkov G.M. Doslidzhennya priyomu akustichnykh impulsiv Emnisnim sposobom [investigation of reception of acoustic impulses by a capacitive way] / Suchkov G.M., Donchenko A.V., Glebova L.V. // VII Mizhnarodna naukovo-tehnichna konferentsiya «Priladobuduvannya 2008: stan i perspektivi» 22-23 kvitnya 2008 r., Zbirnik tez dopovidey – NTUU «KPI». : Kiyiv, 2008 r. – P. 217-218.
83. Suchkov G.M. Doslidzhennya priyomu akustichnykh impulsiv Emnisnim sposobom [investigation of reception of acoustic impulses by a capacitive way] / Suchkov G.M., Donchenko A.V., GLEBOVA L.V. // Persha studentska naukovo-tehnichna konferentsiya «Priladobuduvannya: stan i perspektivi» 23 kvitnya 2008 r., Tezi dopovidey – NTUU «KPI». : Kiyiv, 2008 r. – P.94-95.
84. Suchkov G.M. Doslidzhennya faktoriv, yaki vplyvayut na zbudzhennya akustichnykh impulsiv Emnisnim sposobom [investigation of factors that influence the excitation of acoustic impulses by capacitive way]. / Suchkov G.M., GLEBOVA L.V. // Vestnik NTU «HPI»: Tematicheskii vyipusk "Pribory i metody kontrolya i opredeleniya sostava veshchestva" – 2008. – No 48. – P. 116-123.
85. Suchkov G.M. Zbudzhennya ultrazvukovykh impulsiv Emnisnim sposobom / Suchkov G.M., Glebova L.V. [Excitation of ultrasonic pulses by a capacitive way] // XVI Mizhnarodna naukovo-praktichna konferentsiya «informatsiyni tehnologiyi: nauka, tehnika, tehnologiya, osvita, zdorov'ya» 4-6 chervnya 2008 r., Zbirnik tez dopovidey – NTU «HPI». : Harkiv, 2008 . – P.442.
86. Glebova L.V. Emkostnyie metody nerazrushayushchego kontrolya [Volumetric methods of nondestructive testing] / Glebova L.V., Suchkov G.M. // III Universitetska naukovo-praktichna studentska konferentsiya magistriv Natsionalnogo tekhnicheskogo universitetu «Harkivskiy politekhnichniy institut» 14-16 kvitnya 2009 r., Tezi dopovidey Chastina 2 – NTU «HPI». : Harkiv, 2009 r. – P.170-172.
87. Glebova L.V. Vozbuzhdenie ultrazvukovykh kolebaniy emkostnyim preobrazovatelem. [Excitation of ultrasonic oscillations by a capacitive transducer] / Glebova L.V., Tyupa I.V., Grigorev A.L., Globa S.N. // Vestnik NTU "HPI": Sbornik nauchnykh trudov "Elektroenergetika i preobrazovatel'naya tehnika" – 2010. – No 12. – P. 192-195.
88. Suchkov G.M. Teoretichni doslidzhennya ultrazvukovogo Emnisnogo peretvoryuvacha [Theoretical studies of ultrasonic capacitive transducer] / Suchkov G.M., Globa S.M., GLEBOVA L.V. // III Mizhnarodna naukovo-tehnichna konferentsiya «PRILADOBUDUVANNYA 2010: stan i perspektivi» 27-28 kvitnya 2010 r., Zbirnik tez dopovidey – NTUU «KPI». : Kiyiv, 2010 r. – P. 216-217.
89. Grigorev A.L. Matematicheskaya model emkostnogo metoda vzbuzhdeniya kolebaniy v uprugih sredah. / Grigorev A.L., Tyupa I.V., Glebova L.V. [Mathematical model of the capacitive method of excitation of oscillations in elastic media] // Visnik NTU "HPI": Tematichniy vipusk "Matematichne modelyuvannya v tehniksi ta tehnologiyah" – 2010. – No 68. – P.38-51.
90. Smirnov V. I. Kurs vysshey matematiki. Vol. III. Chast 2 [Course of higher mathematics. Volume III. Part 2]. – Moscow: Nauka, 1974. – 672 p.

Надійшла (received) 12.11.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Методи и средства ультразвукового контроля металлоизделий трубчатого, стержневого и пластинчатого типа (Обзор ч.1) / С.Ю. Плеснецов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №36(1258). – С 49–61 – Библиогр.: 90 назв. – ISSN 2519-2671

Методи і засоби ультразвукового контролю металовиробів трубчатого, стрижневого та пластинчатого типу (Огляд ч.1) / С.Ю. Плеснецов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №36(1258). – С 49–61 – Библиогр.: 90 назв. – ISSN 2519-2671

Methods and means of ultrasonic control of metal products of tubular, rod and plate type (Review p.1) / S.Yu. Plesnetsov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment of materials processing in engineering and metallurgy. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No 36(1258). – P. 49–61. – Bibl.:90. – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Плеснецов Сергій Юрійович – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри «Комп’ютерні та радіоелектронні системи контролю та діагностики», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», тел.: (050) 841-30-09; e-mail: s.plesnetsov@gmail.com.

Плеснецов Сергей Юрьевич – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Компьютерные и радиоэлектронные системы контроля и диагностики», Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», тел.: (050) 841-30-09; e-mail: s.plesnetsov@gmail.com.

Plesnetsov Sergey Yuriyovich – PhD, Senior Lecturer of the Department "Computer and Radioelectronic Systems for Testing and Diagnostics", National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", tel.: (050) 841-30-09; e-mail: s.plesnetsov@gmail.com.