

УДК 620.179.1

РЕЄСТРАЦІЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ХВИЛІ НА ШОРСТКІЙ ПОВЕРХНІ ЗА ДОПОМОГОЮ ЕЛЕКТРОМАГНІТО-АКУСТИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

З. П. Лютак, Ю. Й. Стрілецький, М. Ю. Левицький, О. В. Ніколаєв

ІФНТУНГ, 76019, Івано-Франківськ, Карпатська, 15, тел. (03422) 42331, public@ifdtung.if.ua

Исследовано влияние шероховатой поверхности контролируемого материала на параметры электромагнитной волны, принимаемой преобразователем

In this paper investigated an influence of surface roughness of controllable material on electric wave parameters which is taken on this value by a transducer

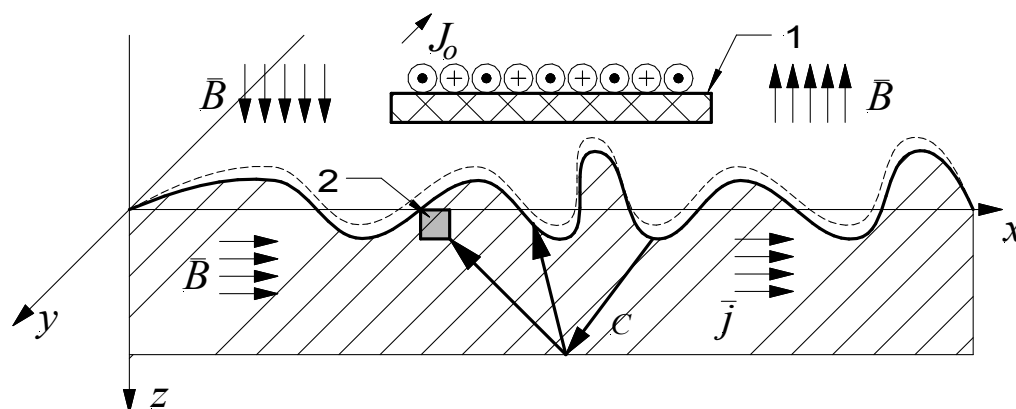
Ультразвукові вимірювання висувають низку вимог до якості поверхні контрольованого об'єкта, зокрема, поверхня повинна бути оброблена до певної чистоти. В експлуатаційних умовах виникають труднощі при підготовці поверхні, що призводить до додаткових втрат енергії та часу, а інколи й унеможливає використання методу. В таких умовах для реєстрації ультразвукових хвиль більш доцільним може бути використання електромагніто-акустичного (ЕМА) перетворювача.

Принцип реєстрації полягає в такому: розміщений біля поверхні об'єкта контролю ЕМА-перетворювач індукує на його поверхні змінний струм J_0 (рис. 1). Даний струм в зовнішньому магнітному однорідному полі з індукцією \bar{B} створює силу Лоренца змінного напрямку, частота якої рівна частоті струму J_0 . Внаслідок дії сили Лоренца на елементарні частинки матеріалу об'єкта контролю виникає падаюча ультразвукова хвиля.

Падаюча ультразвукова хвиля зі швидкістю C відбивається від донної поверхні матеріалу у вигляді двох хвиль – поздовжньої та поперечної. В приповерхневому шарі досліджуваного об'єкта, відбиті поздовжні та поперечні ультразвукові хвилі створюють коливання його поверхні визначеної частоти та шару повітря, що до неї прилягає. Дані коливання досліджуваного об'єкта в зовнішньому магнітному однорідному полі \bar{B} індукують електромагнітне поле, яке згасає в металі, проте без втрат розповсюджуються в проміжному шарі повітря над поверхнею досліджуваного об'єкта, що викликає різницю потенціалів на кінцях чутливого елемента ЕМА-перетворювача.

Різниця потенціалів, величина якої залежить від розміщення та конфігурації чутливого елемента, а також параметрів електромагнітного поля, несе інформацію про фізичні параметри досліджуваного об'єкта.

Оскільки при контролі фізичних параметрів досліджуваного об'єкта ми використовуємо ультразвукові хвилі одного типу (напри-



1 – ЕМА-перетворювач, 2 – елемент об'єкту контролю

Рисунок 1 - Схематичне зображення роботи ЕМА перетворювача

клад, повздовжні), а в процесі збудження на шорсткій поверхні та відбиття від нижнього краю об'єкту контролю виникають хвилі двох типів, що мають різну швидкість поширення, то хвилі другого типу не використовуються. Відбиті ультразвукові хвилі двох типів створюють відповідні електромагнітні поля в шарі повітря над об'єктом контролю. Дані електромагнітні поля генерують в ЕМА-перетворювачі електричні імпульси, одні з яких є корисним сигналом, а інші відіграють роль завад і призводять до неточності вимірювання. Тому, завданням даного дослідження є визначення величини корисного сигналу та шумів, а також вияву чинників, що впливають на ці величини та пошук шляхів максимального відношення сигнал/шум.

Величини корисного сигналу та шумів можна знайти, визначивши розподіл потенціалу електромагнітного поля φ над поверхнею досліджуваного об'єкта, як функцію координат x , y , z та густини струму в об'єкті контролю, що створений кожною із двох ультразвукових хвиль окремо.

Розрахунок параметрів електромагнітного поля над поверхнею металу досліджуваного об'єкта, проводимо з використанням теорії електромагнітного поля, враховуючи, що струми в металі є імпульсними.

Для спрощення завдання будемо вважати, що протікання струму в металі можна описати гармонійним законом, оскільки будь-який імпульс можна розкласти на гармонійні сигнали за допомогою ряду Фур'є. Визначивши закон перетворення для кожної з гармонік ряду, можна знайти правило для перетворення імпульсу будь-якої форми загалом. Для створення ультразвукових коливань ми використовуємо імпульси з частотою 5 МГц, що відповідає довжині електромагнітних хвиль в повітрі в кілька десятків метрів. Електромагнітна хвиля, поширюючись по границі розділу повітря-метал з нерівностями в кілька міліметрів, огинає ці нерівності. В металі довжина хвилі значно менша, і тому величина шорсткості є джерелом шумів.

При розв'язанні задачі будемо вважати, що поверхня є обробленою за середнім класом точності, а для грубо обробленої поверхні отримані результати значення величин корисного сигналу та шумів будуть першим наближенням.

Введемо деякі позначення. Нехай електромагнітне поле над поверхнею металу описується вектором потенціалу $\vec{\varphi}$, який паралельний вектору густини струму в металі j . Будемо вважати, що падаюча хвиля плоска і її хвильові вектори лежать в площині zOx , тоді форма ліній

струму в металі та ліній вектора потенціалу $\vec{\varphi}$ є прямою, X та Z компоненти вектора $\vec{\varphi}$ дорівнюють нулю. Векторний потенціал задовольняє умовам Гельмгольца [1]

$$\Delta\varphi + k_m^2 \cdot \varphi = -\mu_0 \cdot \mu \cdot j, \quad (1)$$

де: $k_m = \omega^2 \cdot \mu_0 \cdot \mu \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 - i\omega \cdot \mu \cdot \mu \cdot \sigma$ - коефіцієнт; σ - питома електропровідність металу; ε_0 , μ_0 - діелектрична та магнітна постійні; ε , μ - відносна діелектрична та магнітна постійні середовища, ω - частота ультразвукової хвилі;

$$\Delta\varphi = \frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2} - \text{оператор Лапласа.}$$

Для повітря рівняння (1) запишемо у вигляді

$$\frac{\partial^2\varphi_{нов}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\varphi_{нов}}{\partial y^2} + k_n^2\varphi_{нов} = -\mu_0 \cdot \mu \cdot j. \quad (2)$$

Враховуючи, що необхідно знайти вектор потенціалу в повітрі, де густина струму і питома електропровідність дорівнює нулю, $\mu = \varepsilon = 1$, $k_n = \omega^2/c^2$, де c - швидкість ультразвуку в повітрі, отримаємо

$$\frac{\partial^2\varphi_{нов}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\varphi_{нов}}{\partial y^2} + k_n \cdot \varphi_{нов} = 0. \quad (3)$$

Розв'яжемо рівняння (3) за допомогою методу розділення змінних

$$\varphi_{нов} = H_1 \cdot e^{H_2 z} \cdot e^{-i(\sqrt{k_n^2 - H_2^2})x} \cdot e^{i\omega t}, \quad (4)$$

де: t - час поширення ультразвуку в металі; H_1 та H_2 - постійні, що визначаються із умови неперервності (тобто при прирівнянні значень потенціалу на границі розділу двох середовищ метал-повітря $\varphi_{нов} = \varphi_{ок} = \varphi$, де $\varphi_{ок}$ - потенціал в металі), як [2]

$$H_1^2 + H_2^2 = k_n^2. \quad (5)$$

Для знаходження даних констант потрібно знайти векторний потенціал в металі досліджуваного об'єкта.

Рівняння (1) для провідного простору буде мати вигляд

$$\frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2} + k_m^2 \cdot \varphi = -\mu \cdot \mu_0 \cdot j, \quad (6)$$

де $k_m = -i\omega \cdot \mu_0 \cdot \mu \cdot \sigma$, оскільки діелектрична постійна ε є малою величиною і її можна прирівняти до нуля.

Враховуючи граничні умови та рівняння (6), знайдемо

$$H_2^2 = k_n - \mu\mu_0 j - k_m^2, \quad (7)$$

а з граничних умов (5) знаходимо константу H_1 .

Знайдемо густину струму із рівняння (7) як функцію координат та часу. Оскільки струм в металі виникає внаслідок коливання його частинок при проходженні падаючої та відбитої хвиль, густину струму можна знайти від кожної з цих хвиль окремо. Густина вихрових струмів визначається за формулою [3]

$$j = \sigma [\bar{V} \cdot \bar{B}], \quad (8)$$

де: \bar{V} - вектор коливальної швидкості металу; \bar{B} - вектор індукції зовнішнього постійного магнітного поля. Впливом магнітного поля самих вихрових струмів можна знехтувати, оскільки їх значення є незначним.

Коливальна швидкість V визначається як

$$V = \frac{du}{dt}, \quad (9)$$

де u - зміщення ультразвукової хвилі.

Зміщення ультразвукової хвилі задамо у вигляді

$$u = A_0 \cdot \exp\left(i\omega \left[t + \frac{z \cdot \cos(\Psi_s) - x \cdot \sin(\Psi_s)}{c} \right]\right), \quad (10)$$

де: A_0 - амплітуда зміщення падаючої ультразвукової хвилі, Ψ_s - кут падіння хвилі.

Розв'яжемо рівняння (9) відносно коливальної швидкості

$$V = \frac{du}{dt} = i\omega \cdot A_0 \cdot \exp\left(i\omega \left[t + \frac{z \cdot \cos(\Psi_s) - x \cdot \sin(\Psi_s)}{c} \right]\right). \quad (11)$$

Враховуючи формули (10) та (11), запишемо рівняння для густини струму

$$j = i\omega \cdot A_0 \cdot B \cdot \sigma \cdot \cos(\Psi_s) \times \exp\left(i\omega \left[t + \frac{z \cdot \cos(\Psi_s) - x \cdot \sin(\Psi_s)}{c} \right]\right). \quad (12)$$

Отже, потенціал над поверхнею металу об'єкту контролю, враховуючи (4), (5), (7) та (12), буде

$$\varphi = (\mu \cdot \mu_0 \cdot j + k_m^2) \cdot \exp\left[(\mu \cdot \mu_0 \cdot j - k_m^2 + k_n)z\right] \times \exp\left[-i\left(\sqrt{k_n^2 - k_n - \mu \cdot \mu_0 \cdot j - k_m^2}\right)x\right] \cdot e^{i\omega t}. \quad (13)$$

При цьому будемо вважати, що вектор індукції зовнішнього магнітного поля напрямлений нормально до поверхні контрольованого об'єкта, а магнітне поле однорідне.

Формули (12) та (13) описують розподіл потенціалу над поверхнею досліджуваного об'єкту, що створений як падаючою, так і відбитими ультразвуковими хвилями.

Знайдемо значення розсіювання енергії поперечної та поздовжньої ультразвукових хвиль.

Розсіювання поздовжньої та поперечної хвиль не можна описати однозначно, оскільки вони не мають єдиного напрямку розповсюдження. Тому виберемо частину розсіяної поперечної хвилі, яка поширюється в межах малого кута $d\Psi_l$. Зміщення в такій хвилі можна описати рівнянням

$$du_1 = A_1 \cdot \exp\left(i\omega \left[t - \frac{z \cdot \cos(\Psi_l) - x \cdot \sin(\Psi_l)}{c} \right]\right) d\Psi_l, \quad (14)$$

де A_1 - амплітуда коливань відбитої хвилі. Величина A_1 залежить від кута падіння і розсіювання, параметрів поверхні розсіювання, частоти. Вихрові струми, що створюються даною розсіяною хвилею можна описати виразом

$$dj_1 = i\omega \cdot A_1 \cdot d\Psi_l \cdot \sigma \cdot B \cdot \cos(\Psi_l) \times \exp\left(i\omega \left[t - \frac{z \cdot \cos(\Psi_l) - x \cdot \sin(\Psi_l)}{c} \right]\right). \quad (15)$$

Аналогічно можна записати струми, що створені розсіяною поздовжньою хвилею, яка поширюється в межах малого кута $d\Psi_2$

$$dj_2 = i\omega \cdot A_2 \cdot d\Psi_2 \cdot \sigma \cdot B \cdot \sin(\Psi_2) \times \exp\left(i\omega \left[t - \frac{z \cdot \cos(\Psi_2) - x \cdot \sin(\Psi_2)}{c} \right]\right). \quad (16)$$

Знаючи густину вихрових струмів, створених розсіюванням ультразвукових відбитих хвиль, можна розрахувати розподіл потенціалу електромагнітної хвилі, що поширюється у вільному просторі, за допомогою рівняння (13). Розрахунок використовує принцип суперпозиції падаючої та відбитих хвиль, що рухаються під різними кутами до нормалі поверхні контрольованого об'єкта.

Мінімізуючи аргументи функції потенціалу φ , які входять у залежності (12), (13), (15), (16), можна оптимізувати відношення сигнал/шум.

Вплив шорсткості поверхні для оброблених та шорстких зразків (на прикладі вимірювання товщини виробу) на значення питомої електропровідності зображено на рис. 2.

