

УДК 534.08

## ОЦІНКА НЕЛІНІЙНОСТІ АКУСТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРІАЛІВ

С.М. ЛІСОВЕЦЬ, Ю.О. СКРИПНИК

Київський національний університет технологій та дизайну

*Запропоновано метод вимірювання нелінійності акустичних характеристик матеріалів, який за рахунок одноканального вибіркового підсилення, детектування та логарифмування пакетів електричних коливань з наступним їх часовим поділом та запам'ятовуванням на двох конденсаторах усуває вплив нелінійності та нестабільності коефіцієнтів перетворення більшості електронних блоків на результат вимірювання відносних змін акустичного коефіцієнта проходження (прозорості) матеріалу, який контролюється, що дозволяє більш достовірно оцінювати нелінійність акустичної характеристики цього матеріалу*

### **Об'єкти та методи дослідження**

Зміна фізико-механічних властивостей багатьох твердотілих матеріалів, наприклад, розміру та кількості зерен в полікристалічних матеріалах (таких як мідь М00, М0 і М1, цинк Ц1, Ц2 і Ц3 та деякі їхні сплави) впливає на параметри пружної хвилі, що зондує матеріал: на її форму, амплітуду та фазу основної та вищих гармонійних складових [1, 2].

Ці зміни викликані залежністю коефіцієнта проходження (прозорості) матеріалу, що досліджується, від інтенсивності (амплітуди) пружної хвилі: так зване явище амплітудно-залежного внутрішнього тертя (АЗВТ) [3–5]. Для оцінки нелінійності акустичного тракту доцільно застосувати такий показник, який однозначно залежить від відношення амплітуд падаючої пружної хвилі та пружної хвилі, що пройшла матеріал.

Труднощі вимірювання такого показника обумовлені тим, що при зміні амплітуди акустичних, а далі електричних коливань виникають спотворення від нелінійності електричних перетворювачів (підсилювачів, випрямлячів, фільтрів, детекторів і так далі), які по рівню такі ж самі або більші акустичної нелінійності.

Тому підвищення достовірності оцінки нелінійності акустичних характеристик матеріалів дозволить підвищити якість діагностування їх фізико-механічних характеристик.

### **Постановка завдання**

Постановка завдання полягає в розробці методу вимірювання показника акустичної нелінійності, який би дозволяв мінімізувати вплив нелінійності та нестабільності більшості електронних блоків на результат вимірювання.

Таким чином, можна було б підвищити як достовірність акустичного контролю, так і спростити процес налагодження апаратури для вимірювання показника акустичної нелінійності, що б підвищило загальну якість контролю.

### **Результати та їх обговорення**

Для розв'язання поставленого завдання пропонується методика та пристрій, функціональна схема якого наведена на рис. 1, і як є подальшим розвитком одноканальних схем порівняння акустичних сигналів [6–8]. Пристрій працює наступним чином.

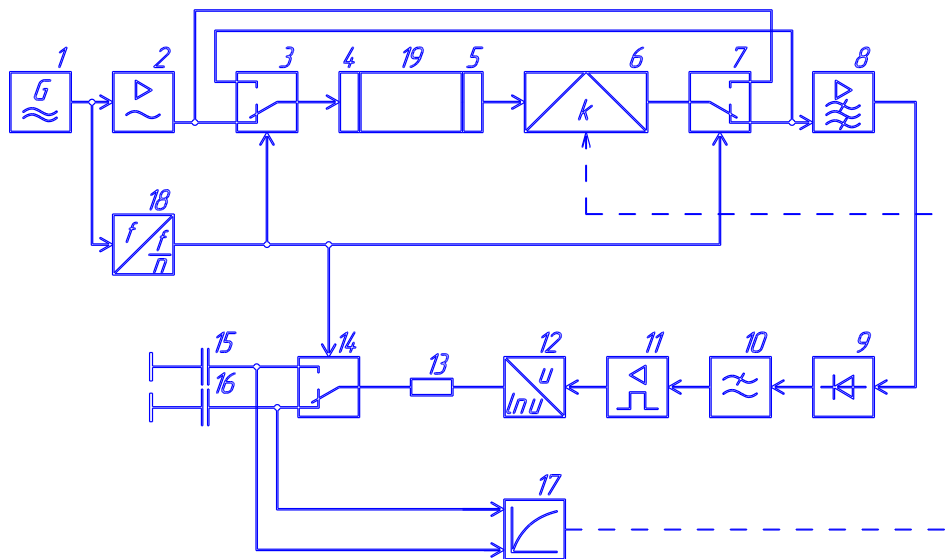


Рис. 1. Функціональна схема пристрою для вимірювання нелінійності акустичних характеристик матеріалів:

1 – генератор електричних коливань; 2 – підсилювач потужності; 3, 7, 14 – автоматичні перемикачі; 4, 5 – електроакустичні перетворювачі; 6 – двоспрямований ослаблювач напруги; 8 – вибірковий підсилювач; 9 – амплітудний детектор; 10 – фільтр нижніх частот; 11 – підсилювач відеоімпульсів; 12 – логарифматор; 13 – постійний резистор; 15, 16 – конденсатори; 17 – вимірювач напруги; 18 – дільник частоти; 19 – матеріал, що зондується

Генератор електричних коливань 1 генерує електричні коливання

$$U_1 \left( \leftarrow \rightleftharpoons U_M \cos \left( \omega t + \varphi_1 \right) \rightleftharpoons \right) \quad (1)$$

де  $U_M$  – амплітуда електричних коливань;  $\omega$  – колова частота електричних коливань;  $\varphi_1$  – початкова фаза електричних коливань.

Електричні коливання (1) підсилюються підсилювачем потужності 2 і через автоматичний перемикач 3 надходять на електроакустичний перетворювач 4, який створює акустичні коливання

$$A_1 \left( \leftarrow \rightleftharpoons K_2 S_4 U_M \cos \left( \omega t + \varphi_1 \right) \rightleftharpoons \right) \quad (2)$$

де  $K_2$  – коефіцієнт підсилення підсилювача потужності 2;

$S_4$  – крутизна перетворення електричних коливань в акустичні електроакустичного перетворювача 4.

Акустичні коливання (2) проходять крізь матеріал 19, що досліджується, згідно з його коефіцієнтом проходження (прозорості):

$$A_2 \left( \leftarrow \rightleftharpoons K_2 S_4 K'_{19} U_M \cos \left( \omega t + \varphi_2 \right) \rightleftharpoons \right) \quad (3)$$

де  $K'_{19}$  – коефіцієнт проходження (прозорості) матеріалу 19 при великому рівні зондуючих акустичних коливань (2), який задається підсилювачем потужності 2;  $\varphi_2$  – початкова фаза акустичних коливань.

Електроакустичним перетворювачем 5 акустичні коливання (3) знову перетворюються в електричні коливання:

$$U_2 \overset{\sim}{=} K_2 S_4 K'_{19} S_5 U_M \cos \omega t + \varphi_2 \quad (4)$$

де  $S_5$  – крутизна перетворення акустичних коливань в електричні електроакустичного перетворювача 5.

Електричні коливання (4) зменшуються по амплітуді двоспрямованим ослаблювачем напруги 6 до значення

$$U_3 \overset{\sim}{=} K_2 S_4 K'_{19} S_5 K_6 U_M \cos \omega t + \varphi_2 \quad (5)$$

де  $K_6$  – коефіцієнт передачі двоспрямованого ослаблювача напруги 6  $K_6 < 1$ .

Електричні коливання (5) через другий автоматичний перемикач 7 потрапляють на вхід вибіркового підсилювача 8, який налагоджений на частоту  $\omega$  генератора електричних коливань 1.

При перемиканні першого і другого автоматичних перемикачів 3 і 7 у протилежне положення на електроакустичний перетворювач 5 починають поступати електричні коливання з виходу підсилювача потужності 2, які ослаблені двоспрямованим ослаблювачем напруги 6:

$$U_4 \overset{\sim}{=} K_2 K_6 U_M \cos \omega t + \varphi_1 \quad (6)$$

Акустичні коливання для вказаного напрямку

$$A_3 \overset{\sim}{=} K_2 K_6 S_5 U_M \cos \omega t + \varphi_3 \quad (7)$$

проходять крізь матеріал 19, що досліджується, і приймаються електроакустичним перетворювачем 4. Зменшення рівня акустичних коливань, які зондують матеріал 19, приводить до збільшення коефіцієнта проходження (прозорості) матеріалу 19 і, внаслідок цього, до збільшення рівня електричних коливань на виході електроакустичного перетворювача 4:

$$U_5 \overset{\sim}{=} K_2 S_4 K''_{19} S_5 K_6 U_M \cos \omega t + \varphi_5 \quad (8)$$

де  $K''_{19} = K'_{19} + \Delta K_{19}$  – зрослий на  $\Delta K_{19}$  коефіцієнт проходження (прозорості) матеріалу 19 при зменшеному рівні акустичних коливань, які зондують матеріал 19.

Електричні коливання (8) також підсилюються тим же самим вибіркоким підсилювачем 8 на частоті основної гармоніки  $\omega$ . При періодичній роботі першого 3 і другого 7 автоматичних перемикачів, перемиканням яких керує дільник частоти 18, вибіркоким підсилювачем 8 по черзі підсилюються пакети електричних коливань (5) і (8) тривалістю в напівперіод керуючої напруги дільника частоти 18. Пакети електричних коливань (5) і (8) (радіоімпульси) по черзі детектуються амплітудним детектором 9 і згладжуються фільтром нижніх частот 10. В результаті усереднення з пакетів електричних коливань (5) і (8) формується послідовність відеоімпульсів з амплітудами

$$U_6 \overset{\sim}{=} K_2 S_4 K'_{19} S_5 K_6 K_8 S_9 K_{10} U_M , \quad (9)$$

$$U_7 \overset{\sim}{=} K_2 S_4 K''_{19} S_5 K_6 K_8 S_9 K_{10} U_M , \quad (10)$$

де  $K_8$  – коефіцієнт підсилення вибіркового підсилювача 8;  $S_9$  – крутизна перетворення амплітудного детектора 9;  $K_{10}$  – коефіцієнт передачі фільтра нижніх частот 10.

Видеоімпульси (9) і (10) по черзі підсилюються підсилювачем видеоімпульсів 11 і логарифмуються логарифматором 12:

$$U_8 \overset{\sim}{\leftarrow} S_{12} \ln \left( K_2 S_4 K'_{19} S_5 K_6 K_8 S_9 K_{10} K_{11} U_M \right) \quad (11)$$

$$U_9 \overset{\sim}{\leftarrow} S_{12} \ln \left( K_2 S_4 K''_{19} S_5 K_6 K_8 S_9 K_{10} K_{11} U_M \right) \quad (12)$$

де  $K_{11}$  – коефіцієнт підсилення підсилювача видеоімпульсів 11;

$S_{12}$  – крутизна логарифмічного перетворення видеоімпульсів логарифматору 12.

За допомогою третього автоматичного перемикача 14, який перемикається синхронно з першим 3 і другим 7 автоматичними перемикачами, видеоімпульси (11) і (12) розділяються в часі та заряджають конденсатори 15 і 16. Постійний резистор 13 з кожним з конденсаторів 15 і 16 утворює інтегруючі запам'ятовуючі комірки. Конденсатор 15 заряджається до напруги

$$U_{10} = K_{13} U_8, \quad (13)$$

а конденсатор 16 заряджається до напруги

$$U_{11} = K_{13} U_9, \quad (14)$$

де  $K_{13}$  – коефіцієнт передачі інтегруючих комірок.

Вимірювачем напруги 17 вимірюється різниця напруг заряджених конденсаторів 15 і 16:

$$U_{12} = U_{11} - U_{10}. \quad (15)$$

Враховуючи те, що різниця логарифмів дорівнює логарифму відношення, отримаємо:

$$U_{12} = K_{13} S_{12} \ln \left( \frac{K''_{19}}{K'_{19}} \right). \quad (16)$$

З отриманого виразу (16) можна побачити, що результат вимірювання по показанням вимірювача напруги 17 визначається тільки відношенням коефіцієнтів проходження (прозорості) матеріалу 19 при двох рівнях акустичних коливань, які встановлюються двоспрямованим ослаблювачем напруги 6, і не залежить від абсолютного рівня акустичних коливань. На результат вимірювання також не впливають нелінійність та непостійність значень крутизни перетворення електроакустичних перетворювачів  $S_4$  і  $S_5$ , нелінійність та непостійність значень коефіцієнта підсилення підсилювачів  $K_2$ ,  $K_8$  і  $K_{11}$ , нелінійність та непостійність значень коефіцієнту передачі фільтрів  $K_{10}$  і  $K_{13}$ , нелінійність та непостійність значення крутизни перетворення амплітудного детектора  $S_9$ .

Результат вимірювання (16) можна представити в вигляді

$$U_{12} = K_{13} S_{12} \ln \left( \frac{K'_{19} + \Delta K_{19}}{K'_{19}} \right) = K_{13} S_{12} \ln \left( 1 + \frac{\Delta K_{19}}{K'_{19}} \right). \quad (17)$$

Враховуючи, що відносна зміна коефіцієнта проходження (прозорості) матеріалу 19 мала  $\left( \frac{\Delta K_{19}}{K'_{19}} \ll 1 \right)$  і розкладаючи логарифмічну функцію (17) в степеневий ряд, отримаємо:

$$U_{12} = K_{13} S_{12} \ln \left( \frac{\Delta K_{19}}{K'_{19}} - \left( \frac{\Delta K_{19}}{K'_{19}} \right)^2 + \left( \frac{\Delta K_{19}}{K'_{19}} \right)^3 - \dots \right). \quad (18)$$

Нехтуючи величинами другого та більш високих порядків малості, остаточно отримуємо:

$$U_{12} = S_0 \left( \frac{\Delta K_{19}}{K'_{19}} \right), \quad (19)$$

де  $S_0 = K_{13} S_{12}$  – результуюча крутизна одноканального перетворення.

Таким чином, результат вимірювання (19) пропорційний відносній зміні коефіцієнта проходження (прозорості) матеріалу 19, який визначається відношенням амплітуд акустичних коливань:

$$\eta = \frac{A_3}{A_1} = K_6. \quad (20)$$

Так як амплітуда  $A_1 = const$ , а змінюється амплітуда  $A_3$  в залежності від значення коефіцієнта передачі  $K_6$  двоспрямованого ослаблювача напруги 6, то шляхом зміни коефіцієнта  $K_6$  можна визначити всі значення відносних змін коефіцієнта проходження (прозорості) матеріалу 19 в залежності від амплітуди акустичних коливань  $A_3$ .

Для цього коефіцієнт передачі  $K_6$  двоспрямованого ослаблювача напруги 6 (див. рис. 2) автоматично змінюється перемінним резистором 20, движок якого механічно пов'язаний з стрічкопротяжним механізмом реєструючого вимірювача напруги 17.

При реєстрації напруги (19) вимірювачем напруги 17 автоматично зменшується (шунтується) перемінний резистор 20 в симетричній П-подібній схемі ослаблювача напруги 6 з постійними резисторами 21 і 22. В процесі зменшення опору перемінного резистора 20 збільшується амплітуда  $A_3$  до значення  $A_1$ .

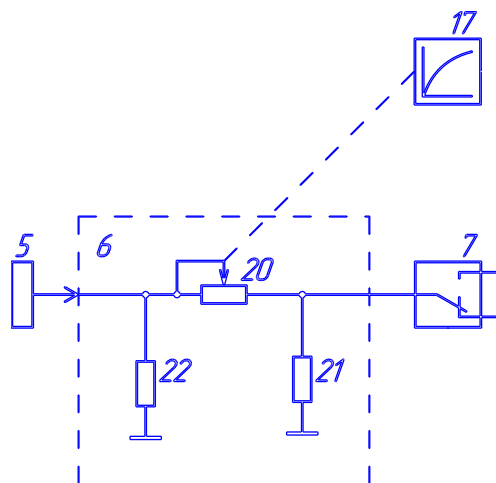


Рис. 2. Принципова схема двоспрямованого ослаблювача напруги 6 :  
20 – перемінний резистор; 21, 22 – постійні резистори

На діаграмній стрічці реєструючого вимірювача напруги 17 (наприклад, автоматичного потенціометра) згідно з (19) і (20) реєструється значення відносних змін коефіцієнта проходження (прозорості) матеріалу 19, які відповідають поточному значенню амплітуди  $A_3$ . В результаті вимірювачем напруги 17 вимірюються і реєструються всі значення відносної зміни коефіцієнта проходження (прозорості) матеріалу 19 від  $A_{3_{\min}}$  до  $A_{3_{\max}} = A_1$ , тобто вся акустична характеристика нелінійності матеріалу 19. Коефіцієнт передачі двоспрямованого ослаблювача напруги 6 визначається опорами перемінного резистора 20 і постійних резисторів 21 та 22, що входять до його складу, при будь-якому напрямку проходження електричних коливань:

$$K_6 = \frac{R_{20}}{R_{20} + R_{21}} = \frac{R_{20}}{R_{20} + R_{22}}, \quad (21)$$

де  $R_{20}$ ,  $R_{21}$  і  $R_{22}$  – опори перемінного резистора 20 і постійних резисторів 21 та 22.

Нелінійність акустичної характеристики матеріалу 19 оцінюється по максимальному значенню зареєстрованої характеристики:

$$\frac{\Delta D}{D} = F\left(\frac{A_3}{A_1}\right) = S_0\left(\frac{\Delta K_{19}}{K_{19}}\right), \quad (22)$$

де  $D$  – коефіцієнт проходження (прозорості) матеріалу в слабких акустичних полях;  $\Delta D$  – зміна коефіцієнта проходження (прозорості) матеріалу.

### Висновки

Використання запропоновано методу в контрольно-вимірювальній техніці дозволяє виявляти приховані дефекти в конструкційних матеріалах, які виготовлені з полікристалічних металів, що характеризуються мікронеоднорідними властивостями; оптимізувати технологічний режим обробки полікристалічних металів (мідь, цинк свинець та деякі інші) з метою отримання заданих параметрів зерна (наприклад, від 50 до 500 мкм); виявляти м'які дефекти-включення, які впливають на пружні властивості матеріалів і характеристики механічної втоми матеріалів; прогнозувати наявність порожнеч і розшарувань в заготовках з гірських порід (мармур, вапняк та деякі інші) і композиційних матеріалах (вуглецеутримуючі та деякі інші).

### ЛІТЕРАТУРА

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости.– М.: Наука, 1987.– 248 с.
2. Молотков И.А. Гистерезис в акустической среде с релаксирующей нелинейностью и вязкостью // Акустический журнал.– 2008.– Т. 54.– № 5.– С. 725–731.
3. Назаров В.Е., Радостин А.В. Волновые процессы в микронеоднородных упругих средах с гистерезисной нелинейностью и релаксацией // Акустический журнал.– 2005.– Т. 51.– № 2.– С. 280–285.
4. Назаров В.Е., Радостин А.В. Численное моделирование динамических гистерезисов для микронеоднородных сред с несовершенной упругостью и релаксацией // Акустический журнал.– 2006.– Т. 52.– № 4.– С. 514–520.
5. Назаров В.Е. Амплитудно-зависимое внутренне трение свинца // Физика металлов и металловедение.–1999.– Т. 88.– № 4.– С. 82–90.

6. Патент № 17425 А. Україна. МПК G01N 29/00. Спосіб оцінки нелінійності акустичного тракту і пристрій для його здійснення.– Скрипник Ю.О., Лісовець С.М.– № 94063007; Заявл. 27.06.1994; Опубл. 06.05.1997.
7. Патент № 22938 А. Україна. МПК G01N 29/04, G01S 15/00. Спосіб вимірювання нелінійності акустичного тракту і пристрій для його здійснення.– Скрипник Ю.О., Здоренко В.Г., Лісовець С.М.– № 96072772; Заявл. 10.07.1996; Опубл. 05.05.1998.
8. Патент № 42857. Україна. МПК G01N 29/11, G01N 29/22. Вимірювач нелінійності акустичного тракту.– Скрипник Ю.О., Лісовець С.М.– № 98063405; Заявл. 30.06.1998; Опубл. 15.11.2001.