

DOI: 10.33955/2307-2180(6)2020.23-30

УДК 534.08

ПІДВИЩЕННЯ ДОСТОВІРНІСТІ ОЦІНКИ МІЦНОСТІ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ЗАСОБАМИ НЕЛІНІЙНОЇ АКУСТИКИ

Increasing the Reliability of Estimation of Strength of Construction Materials by Means of Nonlinear Acoustic

С. М. Лісовець, кандидат технічних наук,
доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій
та вимірювальної техніки,
Київський національний університет технологій
та дизайну, Україна,
e-mail: ser.lis.290171@gmail.com

М. А. Зенкін, доктор технічних наук,
професор кафедри машин та агрегатів
поліграфічного виробництва,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
ім. Ігоря Сікорського»,
e-mail: nikolay_zenkin@ukr.net

S. M. Lisovets, candidate of technical sciences,
associate professor of computer integrated technologies
and measurement technology,
Kyiv national university of technology
and design, Ukraine,
e-mail: ser.lis.290171@gmail.com

M. A. Zenkin, doctor of engineering,
professor of the department of machines
and units of printing production,
National technical university of Ukraine
«Kyiv polytechnic institute
named Igor Sikorsky»,
e-mail: nikolay_zenkin@ukr.net

Показано, що деякі з конструкційних матеріалів (особливо з вираженою полікристалічною структурою і/або утомними чи термічними пошкодженнями) мають аномально великі акустичні нелінійні властивості, і для діагностики таких матеріалів пропонуються засоби вимірювання амплітудно-залежних змін коефіцієнта поглинання і швидкості розповсюдження акустичних коливань. Застосування в цих засобах комутаційно-модуляційного принципу вимірювання дозволяє визначати такі амплітудно-залежні зміни на рівні десятих і навіть сотих частин відсотка.

It is known that structural materials are widely used in the manufacture of various mechanisms in mechanical engineering and in the construction of buildings and structures in construction. Their main purpose — to resist external loads. Detection in such materials of both subfloor defects with a small depth and deep defects is a difficult task. This is especially true of defects that are already present in the material, but due to their low concentration cannot be detected by linear acoustic means. For example, the search for crack nuclei in structural materials that have a pronounced polycrystalline structure or fatigue or thermal damage is currently relevant.

Non-linear acoustics can be used to detect such defects. Analysis of most modern works on nonlinear

acoustics shows the following. First, it is believed that the presence of violations of the structure of solids by several orders of magnitude changes their nonlinear acoustic properties. Second, it is believed that acoustic nonlinearity is inherent in most real solids.

Acoustic nonlinear behavior of solids is manifested in the form of various effects: nonlinear hysteresis and dissipation, frequency-dependent elastic nonlinearity, frequency-independent quality factor, and so on. One of these manifestations is amplitude-dependent changes in the absorption coefficient and the speed of propagation of acoustic oscillations, which can be affected by the number, size, orientation, distribution, degree of softness and other parameters of defects.

One of the main problems in detecting such amplitude-dependent changes is their small size. They usually do not exceed tenths or even hundredths of a percent. It is almost impossible to detect such small changes by direct measurement. Therefore, the article proposes to apply the commutation-modulation principle of measurement, which allows such small changes in the absorption coefficient and propagation rate to be detected. In particular, the article proposes means of measuring separately both changes in the absorption coefficient and changes in the speed of propagation of acoustic oscillations, on the basis of which it is possible to build relationships between these changes and the level of defects.



С. М. Лісовець



М. А. Зенкін

Ключові слова: акустична нелінійність, конструкційний матеріал, «м'які» дефекти, неруйнівний контроль, порушення структури, тріщини.

Key words: acoustic nonlinearity, structural material, «soft» defects, non-destructive testing, structural damage, cracks.

ВСТУП

Конструкційні матеріали широко застосовуються під час виробництва різноманітних механізмів у машинобудуванні та зведення будівель і споруд у будівництві. Незалежно від сфери застосування, основне призначення конструкційних матеріалів — опиратися зовнішнім навантаженням. Це пов'язано з тим, що елементи, виконані з конструкційних матеріалів, постійно піддаються різним стороннім впливам.

Конструкційні матеріали можна класифікувати, їх поділяють на неметалеві, металеві й композиційні (залежно від речовини, із якої вони зроблені); низько- і високотемпературні (залежно від робочої температури); стійкі або нестійкі по відношенню до агресивного зовнішнього середовища і так далі. У будь-якому випадку міцність елементів із конструкційних матеріалів, як одна з головних характеристик таких елементів, повинна бути проконтрольована. Це може бути одноразовий контроль під час виробництва або періодичний контроль під час експлуатації. Як відомо, контроль може бути як руйнівним, так і неруйнівним.

При руйнівному контролі фрагмент конструкційного матеріалу спочатку вилучається, після чого досліджується. Для багатьох елементів із конструкційних матеріалів такий контроль є неприйнятним, оскільки руйнування цих елементів є недопустимим. Отже, якщо замість руйнівного контролю можна використати неруйнівний, то саме такий контроль і бажано застосовувати. Традиційно неруйнівний контроль поділяється на такі види: магнітний, електричний, вихрострумний, радіохвильовий, тепловий, оптичний, радіаційний, акустичний і проникаючими речовинами [1]. Кожен із видів контролю, в свою чергу, поділяється на методи контролю залежно від характеру взаємодії фізичних полів або речовин з контрольованим об'єктом, первинних інформативних параметрів і способів отримання первинної інформації. Більш пізні стандарти додають ще кілька видів і методів неруйнівного контролю [2].

Одним із ефективних видів неруйнівного контролю є акустичний контроль [3]. Його застосування дозволяє виявляти як підповерхневі дефекти з глибиною залягання (0,5...1,0) мм, так і дефекти в глибині [4]. Він полягає у випромінненні пружних механічних (акустичних) коливань у контрольований конструкційний елемент і реєстрації їх або після відбиття від неоднорідності, або після проходження через неоднорідність [5]. Або у реєстрації коливань, які утворюються за протікання в контро-

льованому конструкційному елементі певних фізичних процесів: наприклад, розвиток тріщини внаслідок механічного навантаження [6]. Часто «класичні» методи акустичного контролю неспроможні забезпечити потрібні значення чутливості й роздільної здатності, оскільки деякі дефекти практично неможливо виявити через особливості їх характеру, форму або розміщення [7]. Тому перспективними є акустичні нелінійні методи контролю, які можна застосовувати до матеріалів, що мають так звану структурну неоднорідність (до таких матеріалів відноситься значна частина конструкційних матеріалів) [8].

Всі реальні тверді тіла (а також конструкційні матеріали із них) мають неоднорідну структуру. Це пов'язано з наявністю в них тріщин, несучільностей, пор і інших порушень структури. З точки зору нелінійної акустики їх можна поділити на такі групи, як: більшість гірських порід, деякі конструкційні матеріали (особливо з вираженою полікристалічною структурою і/або утомними чи термічними пошкодженнями), деякі види бетонів, гранульовані середовища [8]. Акустична нелінійність у таких тілах принципово відрізняється від традиційної пружної гранчастої нелінійності, яка пов'язана з проявом слабкого ангармонізму міжатомного потенціалу [9].

У більшості сучасних робіт з нелінійної акустики можна простежити два основні висновки. По-перше, вважається, що наявність порушень структури твердих тіл на кілька порядків змінює їх нелінійні акустичні властивості. По-друге, вважається, що акустична нелінійність властива більшості реальних твердих тіл [8]. Акустична нелінійність описується нелінійним законом Гука другого, третього або більш високого степеня [8]:

$$\sigma = E(\varepsilon + \gamma_2 \varepsilon^2 + \gamma_3 \varepsilon^3 + \dots), \quad (1)$$

де E — лінійний модуль пружності; $\gamma_2, \gamma_3, \dots$ — нелінійні коефіцієнти; ε — відносна деформація; σ — механічна напруга.

Як показано у роботі [8], для однорідних аморфних речовин і монокристалів нелінійні коефіцієнти γ_2 і γ_3 не перевищують кількох одиниць. Оскільки звичайні акустоелектричні випромінювачі можуть забезпечити в досліджуваному середовищі відносну деформацію ε такого середовища не більше $10^{-4} \dots 10^{-5}$, то виявити вплив складових $\gamma_2 \varepsilon^2$ і $\gamma_3 \varepsilon^3$ на фоні складової ε (тобто виявити складові $\gamma_2 \varepsilon$ і $\gamma_3 \varepsilon^2$) практично неможливо [10].

Через складність взаємодії акустичних коливань і структурно-неоднорідних середовищ різноманітності нелінійних акустичних ефектів, які в них виникають, є достатньо значним [11, 12]. Наприклад,

у роботах [13, 14] розглянута модель таких середовищ з урахуванням нелінійного гістерезису, в роботі [15] — з урахуванням нелінійної дисипації, в роботі [16] — з урахуванням частотно-залежної пружної нелінійності, в роботі [17] — з урахуванням частотно-незалежної добротності. Список таких робіт можна продовжувати. У багатьох роботах можна побачити, що структурна неоднорідність твердих тіл є чутливою до структури таких тіл, тобто до наявності в них так званих «м'яких» дефектів. У деяких роботах також можна побачити, що дуже актуальним є пошук місць зародження в такому середовищі тріщин (відносна «м'якість» на рівні 10^{-4}) [8]. Відносну концентрацію «м'яких» дефектів на рівні $10^{-8} \dots 10^{-7}$ можна вважати особливо цікавою для досліджень, оскільки в цьому випадку чутливість лінійних акустичних методів є ще недостатньою для виявлення таких дефектів, а чутливість нелінійних акустичних методів уже є достатньою. Дуже велика чутливість нелінійних акустичних методів пояснюється тим, що за збільшення відносних концентрацій «м'яких» дефектів від приблизно $10^{-8} \dots 10^{-7}$ до $10^{-4} \dots 10^{-3}$ нелінійні коефіцієнти γ_2 і γ_3 можуть становити вже не кілька одиниць, а кілька тисяч одиниць, внаслідок чого акустична нелінійність твердих тіл дуже стрімко збільшується [18]. Отже, метою дослідження було розроблення засобів для оцінки міцності конструкційних матеріалів (насамперед, конструкційних матеріалів з вираженою полікристалічною структурою і/або утомними чи термічними пошкодженнями), робота яких заснована на нелінійних акустичних явищах.

Взаємодія акустичних коливань із структурно-неоднорідними середовищами призводить до появи різних нелінійних акустичних ефектів. Серед них можна виділити як зміну коефіцієнта поглинання акустичних коливань, так і зміну швидкості її розповсюдження — причому такі зміни залежать від амплітуди акустичних коливань на вході в контрольоване середовище. Тобто такі зміни є амплітудно-залежними. Причому такі амплітудно-залежні зміни відносяться як до акустичних коливань у цілому, так і до їх гармонік (в основному, першої й другої). Отже, зондуючи структурно-неоднорідні середовища акустичними коливаннями достатньо невеликої потужності можна, за їх амплітудно-залежними змінами коефіцієнтів поглинання і швидкостей розповсюдження, виявляти «м'які» дефекти. Наприклад, у випадку наявності в структурно-неоднорідному середовищі (наприклад, полікристалічному металі) зародків тріщин це дозволить здійснювати ранню діагностику такого конструкційного матеріалу

ще до інтенсивного розвитку таких тріщин і появи небезпеки для людей і навколишнього середовища.

Незважаючи на те, що внаслідок структурної неоднорідності твердих тіл амплітудно-залежні зміни коефіцієнтів поглинання і швидкостей розповсюдження акустичних коливань вже є помітними, виявити їх «традиційними» методами дуже складно — це пов'язано з тим, що такі зміни, зазвичай, не перевищують не тільки кількох відсотків, але й десятих і сотих частин відсотків. Отже, задачею дослідження було розроблення засобів вимірювання амплітудно-залежних змін коефіцієнтів поглинання і швидкостей розповсюдження акустичних коливань, які дозволяють суттєво підвищити чутливість і роздільну здатність під час вимірювання. Отже, достовірність отримуваної інформації стосовно стану конструкційних матеріалів може суттєво підвищитися.

ОСНОВНИЙ ТЕКСТ СТАТТІ

Пропонуються два основних засоби вимірювання акустичної нелінійності: за амплітудно-залежною зміною коефіцієнта поглинання і за амплітудно-залежною зміною швидкості розповсюдження акустичних коливань. Для вимірювання амплітудно-залежної зміни коефіцієнта поглинання акустичних коливань можна запропонувати пристрій, схему якого наведено на рис. 1 [19]. До його складу входять генератор електричних коливань 1, регульований дільник напруги 2, дільник напруги 3, автоматичний перемикач 4, дільник частоти 5, структурно-неоднорідне середовище 6, дільник напруги 7, автоматичний перемикач 8, підсилювач з регульованим коефіцієнтом підсилення 9, амплітудний детектор 10, фільтр нижніх частот 11,

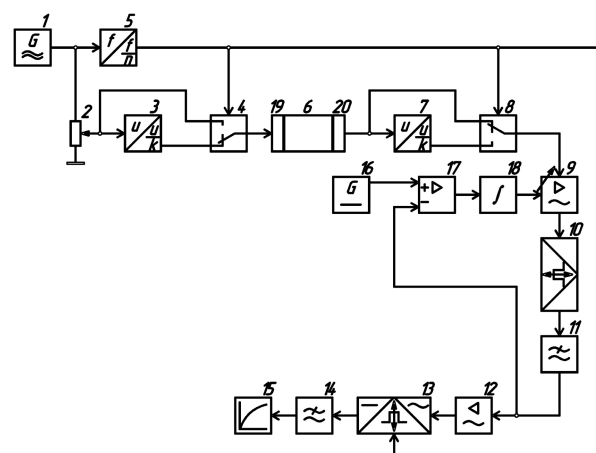


Рис. 1. Пристрій для вимірювання амплітудно-залежної зміни коефіцієнта поглинання акустичних коливань

Fig. 1. Device for measuring amplitude-dependent change of acoustic absorption coefficient

підсилювач змінної напруги 12, фазочутливий випрямляч 13, фільтр нижніх частот 14, вимірювач напруги 15, джерело опорної напруги 16, диференціальний підсилювач 17, інтегратор 18, електроакустичний випромінювач 19 і електроакустичний приймач 20. Пристрій працює у такий спосіб. На початку вимірювань контакт дільника 2 повинен міститися в нижньому положенні, що відповідає мінімальному значенню амплітуди електричних коливань на цьому контакті. Електричні коливання з контакту дільника 2, за вказаного положення перемикача 4, збуджують у середовищі 6 акустичні коливання з амплітудою ε_1 :

$$\varepsilon_1 = U_{m1}' S_1 = U_m k_2 k_3 S_1, \quad (2)$$

де U_{m1} — амплітуда електричних коливань генератора 1; k_2 — коефіцієнт масштабного перетворення дільника 2; k_3 — коефіцієнт масштабного перетворення дільника 3; S_1 — крутизна перетворення електричних коливань з амплітудою U_{m1}' в акустичні коливання.

Акустичні коливання, які пройшли середовище 6, перетворюються знову в електричні коливання, які, за вказаного положення перемикача 8, надходять на вхід підсилювача 9. Амплітуда прийнятих електричних коливань U_{m1}'' :

$$U_{m1}'' = k_6 S_2 \varepsilon_1 = U_m k_2 k_3 S_1 k_6 S_2, \quad (3)$$

де k_6 — коефіцієнт поглинання середовища 6 за амплітуди акустичних коливань ε_1 ; S_2 — крутизна перетворення акустичних коливань в електричні. У протилежному положенні перемикачів 4 і 8 на середовище 6 впливають неослаблені дільником 3 електричні коливання, які збуджують збільшені акустичні коливання з амплітудою ε_2 :

$$\varepsilon_2 = U_{m2}'' S_1 = U_m k_2 S_1. \quad (4)$$

Амплітуда U_{m2}'' прийнятих електричних коливань, з урахуванням включення в електричний ланцюг дільника 7, має вид:

$$U_{m2}'' = \varepsilon_2 (k_6 - \Delta k_6) S_2 k_7 = U_m k_2 S_1 (k_6 - \Delta k_6) S_2 k_7, \quad (5)$$

де $(k_6 - \Delta k_6)$ — коефіцієнт поглинання середовища 6 за амплітуди акустичних коливань ε_2 ; k_7 — коефіцієнт масштабного перетворення дільника 7. Перемикачі 4 і 8 керуються змінною прямокутною напругою U_K , частота f_K якої визначається коефіцієнтом ділення частоти N дільника 5. У результаті періодичного збільшення амплітуди електричної напруги ($U_{m2} > U_{m1}$) на виході перемикача 4 формуючи пакети збуджуючих середовище 6 електричних коливань із співвідношенням амплітуд, яке задається дільником напруги 3. Ці електричні коливання мають вид амплітудно-модульованого сигналу з прямокутною обвідною з частотою комутації f_K . Через акустичну нелінійність середовища 6 співвід-

ношення амплітуд ε_1' і ε_2' акустичних коливань, які приймаються, трохи змінюється внаслідок залежності коефіцієнтів поглинання k_6 і $(k_6 - \Delta k_6)$ від амплітуди цих коливань. Зазвичай з ростом амплітуди акустичних коливань поглинання цих коливань збільшується. В кожний напівперіод $T_K = 0,5/f_K$ комутації прийняті електричні коливання повторюють форму і розмах акустичних коливань. Але в результаті періодичного зменшення і збільшення амплітуди прийнятих електричних коливань дільником напруги 7 на виході перемикача 8 формуються пакети електричних коливань зі змінним співвідношенням амплітуд. Якщо зміни амплітуд електричних коливань, які випромінюються і приймаються, здійснювати синхронно і протифазно, але при цьому збільшення і зменшення амплітуд електричних коливань здійснювати в однакову кількість раз ($k_3 = k_7$), то глибина амплітудної модуляції залежатиме тільки від різниці Δk_6 між коефіцієнтами поглинання k_6 і $(k_6 - \Delta k_6)$. За акустично-лінійного середовища 6 ($\Delta k_6 = 0$) амплітудна модуляція на виході перемикача 8 повністю зникає. Модульована напруга, яка складається з пакетів електричних коливань з амплітудами U_{m1}'' і U_{m2}'' підсилюється підсилювачем 9 і детектується детектором 10. Фільтром 11 з неї виділяється огинаюча, яка містить постійну і змінну складові. Постійна складова напруги U_3 пропорційна напівсумі амплітуд пакетів коливань і з урахуванням рівності $k_3 = k_7$ має такий вид:

$$U_3 = 0,5k_9 S_3 (U_{m1}'' + U_{m2}'') = 0,5k_9 S_3 U_m k_2 S_1 S_2 k_3 (2k_6 - \Delta k_6), \quad (6)$$

де S_3 — чутливість детектора 10; k_9 — коефіцієнт підсилення підсилювача 9. Змінна складова напруги U_4 пропорційна напіврізниці амплітуд пакетів коливань і з урахуванням рівності $k_3 = k_7$ має такий вид:

$$U_4 = 0,5k_9 S_3 (U_{m1}'' - U_{m2}'') = 0,5k_9 S_3 U_m k_2 S_1 S_2 k_3 \Delta k_6. \quad (7)$$

Змінна складова напруги U_4 з виходу фільтра 11 підсилюється підсилювачем 12 і випрямляється випрямлячем 13. При цьому постійна складова напруги U_3 з виходу фільтра 11 через підсилювач 12 не проходить. Випрямлена напруга згладжується фільтром 14 і надходить на вхід вимірювача 15. Постійна складова напруги U_3 з виходу фільтра 11 впливає на один із входів підсилювача 17, на інший вхід якого надходить опорна напруга U_5 джерела опорної напруги 16. Змінна складова напруги U_4 з виходу фільтра 11 також надходить на вхід диференціального підсилювача 17. Однак інтегратор 18 подавляє цю складову, і вона не впливає на коефіцієнт підсилення підсилювача 9.

На виході підсилювача 17 утворюється підсилена різницева напруга U_6 :

$$U_6 = k_{17}(U_3 - U_5) = k_{17}(0,5k_9 S_3 U_m k_2 S_1 S_2 K_3 (2k_6 - \Delta k_6) - U_5), \quad (8)$$

де k_{17} — коефіцієнт підсилення підсилювача 17. Різницева напруга U_6 заряджає інтегратор 18, вихідна напруга якого змінює коефіцієнт підсилення підсилювача 9. Процес регулювання цього коефіцієнта триватиме доти, поки вхідні напруги U_3 і U_5 підсилювача 17 не стануть рівними. В усталеному стані ($U_3 = U_5$) коефіцієнт підсилення k_9 підсилювача 9 матиме таке значення:

$$k_9 = \frac{2U_5}{S_3 U_m k_2 S_1 S_2 k_3 (2k_6 - \Delta k_6)}. \quad (9)$$

Змінна складова напруги U_4 , з урахуванням усталеного значення коефіцієнта підсилення k_9 , прийме такий вид:

$$U_4 = U_5 \frac{\Delta k_6}{2k_6 - \Delta k_6}. \quad (10)$$

Напруга U_7 , яка реєструється вимірювачем 15, буде такою:

$$U_7 = U_5 k_{12} k_{13} \frac{\Delta k_6}{2k_6 - \Delta k_6}, \quad (11)$$

де k_{12} — коефіцієнт підсилення підсилювача 12; k_{13} — коефіцієнт випрямлення випрямляча 13. Значенням Δk_6 в знаменнику (11) можна знехтувати і прийняти, що

$$U_7 = U_5 k_{12} k_{13} \frac{\Delta k_6}{2k_6}. \quad (12)$$

З урахуванням співвідношення (12) отримаємо, що:

$$\frac{\Delta k_6}{k_6} = \frac{2U_7}{U_5 k_{12} k_{13}}. \quad (13)$$

Як можна побачити з формули (13), відносну зміну $\Delta K/K$ коефіцієнта поглинання K акустичних коливань можна визначити, знаючи: напругу U_7 , яка реєструється вимірювачем 15, опорну напругу U_5 джерела 16, коефіцієнт підсилення k_{12} підсилювача 12 і коефіцієнт випрямлення k_{13} випрямляча 13.

Для вимірювання амплітудозалежної зміни швидкості розповсюдження акустичних коливань можна запропонувати пристрій, схему якого наведено на рис. 2 [20]. До його складу входять генератор електричних коливань 1, трансформатор 2, комутатор 3, автоматичний перемикач 4, електроакустичний випромінювач 5, електроакустичний приймач 6, підсилювач-обмежувач 7, підсилювач-обмежувач 8, фазовий детектор 9, широкосмуговий підсилювач 10, фільтр нижніх частот 11, підсилювач постійної напруги 12, генератор опорних ко-

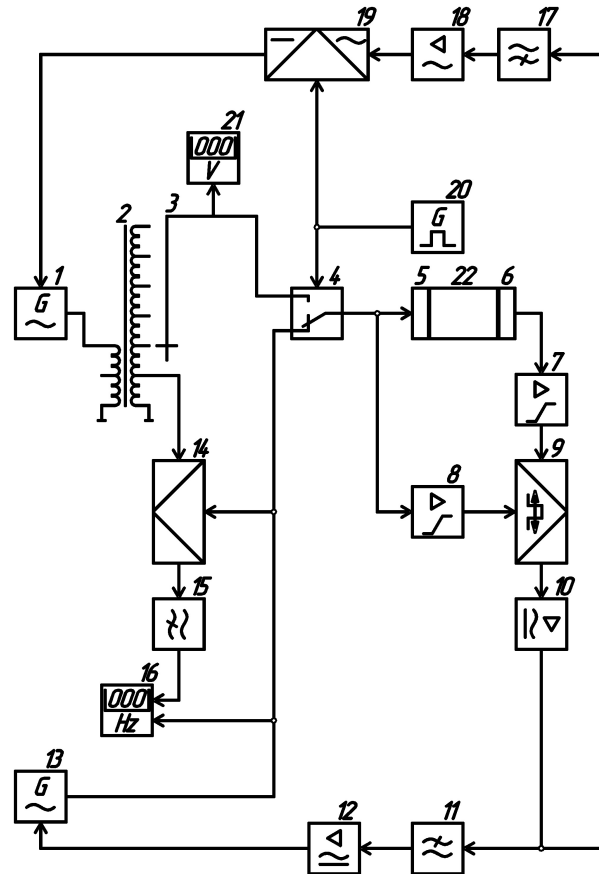


Рис. 2. Пристрій для вимірювання амплітудозалежної зміни швидкості розповсюдження акустичних коливань

Fig. 2. Device for measuring the amplitude-dependent change in the speed of propagation of acoustic oscillations

ливань 13, балансний змішувач 14, фільтр нижніх частот 15, цифровий частотомір 16, фільтр верхніх частот 17, підсилювач змінної напруги 18, фазочутливий випрямляч 19, мультивібратор 20, цифровий вольтметр 21 і структурно-неоднорідне середовище 22. Пристрій працює у такий спосіб. Електричні коливання $U_1(t)$ створюють за допомогою генератора 1:

$$U_1(t) = U_{m1} \cos(\omega_1 t + \varphi_1), \quad (14)$$

де U_{m1} — амплітуда електричних коливань генератора 1; ω_1 — колова частота електричних коливань генератора 1; φ_1 — початкова фаза електричних коливань генератора 1; t — час. Крім цього, створюють електричні опорні коливання $U_{13}(t)$ за допомогою генератора 13:

$$U_{13}(t) = U_{m13} \cos(\omega_{13} t + \varphi_{13}), \quad (15)$$

де U_{m13} — амплітуда електричних коливань генератора 13; ω_{13} — колова частота електричних коливань генератора 13; φ_{13} — початкова фаза електричних коливань генератора 13.

У початковому положенні перемикача 4 електричні опорні коливання $U_{13}(t)$, які мають постійну

амплітуду, перетворюються за допомогою випромінювача 5 в акустичні опорні коливання, які проходять через середовище 22 і приймаються приймачем 6. Прийняті акустичні опорні коливання перетворюються в прийняті електричні опорні коливання

$$U_6(t) = k_{22} U_{m13} \cos(\omega_{13} t + \varphi_{13} + \Delta\varphi_{13}), \quad (16)$$

де $\Delta\varphi_{13}$ — додатковий фазовий зсув акустичних опорних коливань, який вноситься середовищем 22 на коловій частоті ω_{13} ; k_{22} — коефіцієнт поглинання акустичних опорних коливань.

Прийняті електричні опорні коливання $U_6(t)$ підсилюють і обмежують за амплітудою підсилювачем 7, після чого вони надходять на перший вхід детектора 9. Одночасно електричні опорні коливання $U_{13}(t)$ безпосередньо через підсилювач 8 надходять на другий вхід детектора 9. Додатковий фазовий зсув, який вносить середовище 22, буде пропорційним його довжині L :

$$\Delta\varphi_{13} = \omega_{13} \frac{L}{c}, \quad (17)$$

де c — швидкість розповсюдження акустичних коливань за їх невеликої амплітуди. Вихідна напруга детектора 9, яка пропорційна фазовому зсуву $\Delta\varphi_{13}$, підсилюється підсилювачем 10. Після цього з неї за допомогою фільтра 11 виділяють постійну складову, яку підсилюють підсилювачем 12. Постійна складова впливає на керуючий вхід генератора опорних коливань 13 і змінює його частоту ω_{13} до отримання фазового зсуву, який кратний 2π :

$$\Delta\varphi_{13}' = \omega_{13}' \frac{L}{c} = 2\pi n, \quad (18)$$

де $\Delta\varphi_{13}'$ — додатковий фазовий зсув, який вносить середовище 22 на коловій частоті ω_{13}' ; ω_{13}' — колова частота генератора 13, яка може змінюватися; n — ціле число. Після цього перемикач 4 переводиться в положення, протилежне показаному на рис. 2, і на випромінювач 5 надходять електричні коливання $U_1(t)$, частота ω_1 яких близька до частоти ω_{13} . Фазовий зсув, який вносить середовище 22 на частоті ω_1 , визначається таким виразом:

$$\Delta\varphi_1 = \omega_1 \frac{L}{c}. \quad (19)$$

Якщо колова частота ω_1 не дорівнює коловій частоті ω_{13}' , то напруга на виході детектора 9 зміниться. За періодичних перемикачів електричних коливань $U_1(t)$ і $U_{13}(t)$ перемикачем 4 на його виході формуватимуться пакети, які складаються з цих коливань, а на виході детектора 9 з'явиться змінна складова напруги, частота якої дорівнює частоті перемикачів пакетів електричних коливань $U_1(t)$ і $U_{13}(t)$. Змінну складову виділяють фільтром 17, підсилюють підсилювачем 18 і випрямляють випрямлячем 19. Випрямлена

напруга впливає на керуючий вхід генератора 1 і змінює його колову частоту ω_1 до значення ω_1' , коли досягається така рівність:

$$\omega_1' = \omega_{13}', \quad (20)$$

де ω_1' — змінена частота генератора 1. За допомогою трансформатора 2 і комутатора 3 збільшують амплітуду електричних коливань $U_1(t)$. При цьому в середовищі 22, за збільшення амплітуди акустичних коливань, їх швидкість c змінюється. Додатковий фазовий зсув, який вносить середовище 22 на коловій частоті ω_1' , матиме такий вид:

$$\Delta\varphi_1' = \omega_1' \frac{L}{c + \Delta c}, \quad (21)$$

де Δc — абсолютна зміна швидкості c акустичних коливань. За нерівності фазових зсувів, які вносить середовище 22 в коливання з різною амплітудою ($\Delta\varphi_1 \neq \Delta\varphi_1'$), знову виникає змінна складова напруги на виході детектора 9. Ця змінна складова після підсилення і випрямлення змінює колову частоту ω_1' генератора 1 до значення ω_1'' , коли досягається фазовий зсув, який кратний 2π :

$$\Delta\varphi_1'' = \omega_1'' \frac{L}{c + \Delta c} = 2\pi n, \quad (22)$$

де $\Delta\varphi_1''$ — додатковий фазовий зсув, який вносить середовище 22 на коловій частоті ω_1'' ; ω_1'' — змінена колова частота генератора 1. Прирівнюючи між собою вирази (18) і (22), отримаємо:

$$\frac{\omega_{13}'}{c} = \frac{\omega_1''}{c + \Delta c}. \quad (23)$$

Розв'язавши рівняння (23) стосовно відносної зміни $\Delta c/c$ швидкості c розповсюдження акустичних коливань, отримаємо:

$$\frac{\Delta c}{c} = \frac{\omega_1'' - \omega_{13}'}{\omega_{13}'}. \quad (24)$$

Електричні коливання $U_1(t)$ і $U_{13}(t)$ додатково змішують у змішувачі 14. Після цього з них за допомогою фільтра 15 видаляють різниці коливань з коловою частотою $(\omega_1'' - \omega_{13}')$. На перший вхід частотоміра 16 надходять різниці електричних коливань з коловою частотою $(\omega_1'' - \omega_{13}')$, а на його другий вхід — електричні коливання $U_2(t)$ з коловою частотою ω_{13}' . У режимі вимірювання відношення частот частотомір 16 показуватиме значення

$$\frac{\omega_1'' - \omega_{13}'}{\omega_{13}'}. \quad (25)$$

Як можна побачити з формули (24), відносна зміна $\Delta c/c$ швидкості c акустичних коливань можна визначити, знаючи колові частоти ω_1'' і ω_{13}' відповідно генератора 1 і генератора 13.

Отже, формули (13) і (25) дозволяють отримати амплітудно-залежні зміни, відповідно, коефіцієнта поглинання і швидкості розповсюдження

акустичних коливань. Напруги і частоти, які входять до складу цих формул, легко вимірюються за допомогою відповідної апаратури. Послідовно проводячи дослідження певних конструкційних матеріалів, можна отримати залежності між амплітудно-залежними змінами коефіцієнта поглинання і швидкості розповсюдження (з одного боку) і параметрами дефектів (з іншого боку) — наприклад, з питомою концентрацією зародків тріщин.

ЗАКЛЮЧНА ЧАСТИНА

У статті показано, що одним із перспективних напрямів дослідження властивостей речо-

вин взагалі й конструкційних матеріалів зокрема, який стрімко розвивається, є нелінійна акустика. Наявність порушень структури матеріалу, яка є у більшості твердих тіл, призводить до складної взаємодії між таким матеріалом і акустичними коливаннями, що призводить до появи різних нелінійних ефектів, рівень яких зазвичай є невеликим.

Вимірюючи такі ефекти за допомогою відповідної високочутливої апаратури, можна здійснювати діагностику дефектів ще на стадії їх зародження, запобігаючи у такий спосіб, аваріям і нещасним випадкам.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

- ГОСТ 18353-79 Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов (*GOST 18353-79 Kontrol nerazrushayushchiy. Klassifikatsiya vidov i metodov* [State Standard 18353-79 Non-destructive testing. Classification of types and methods]).
- ДСТУ 2865-94 Контроль неруйнівний. Терміни та визначення (*DSTU 2865-94 Kontrol neruinivnyi. Terminy ta vyznachennia* [State Standard 2865-94 The control is non-destructive. Terms and definitions]).
- Скальський В.Р. Основи акустичних методів неруйнівного контролю / В.Р. Скальський, Г.Т. Сулим. — Львів: Видав. центр ЛНУ ім. Івана Франка (Skalskyi, V.R., & Sulym, H.T. *Osnovy akustychnykh metodiv neruinivnoho kontroliu* [Fundamentals of acoustic methods of non-destructive testing]. Lviv: Vydav. tsentr LNU im. Ivana Franka [in Ukrainian]), 2010. — 386 с.
- Радько О.В. Вибір методів контролю якості конструкційних елементів машин та механізмів / О.В. Радько, Н.А. Медведєва, О.І. Кремешний // Системи озброєння і військова техніка (Radko O.V., Miedviedieva N.A., & Kremeshnyi O.I. (2015). *Vybir metodiv kontroliu yakosti konstruktsiinykh elementiv mashyn ta mekhanizmv* [Selection of methods of quality control of structural elements of machines and mechanisms]. *Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika* [in Ukrainian]). — 2015. — № 2(42). — С. 127—130.
- ГОСТ 23829-85 Контроль неразрушающий акустический. Термины и определения (*GOST 23829-85 Kontrol nerazrushayushchiy akusticheskiy. Terminy i opredeleniya* [State Standard 23829-85 Non-destructive acoustic control. Terms and Definitions]).
- ГОСТ 27655-88 Акустическая эмиссия. Термины, определения и обозначения (*GOST 27655-88 Akusticheskaya emissiya. Terminy, opredeleniya i oboznacheniya* [State Standard 27655-88 Acoustic emissions. Terms, definitions and symbols]).
- Незрушающий 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. (Ermolov Y.N., Aleshyn N.P., & Potapov A.Y. *Akusticheskiye metody kontrolya: Prakt. posobie* [Acoustic control methods: Pract. allowance]. *Nerazrushayushchiy kontrol* [Nondestructive control]. М.: Vyssh. shk. [in Russian]), 1991. — 283 с.: ил.
- Зайцев В.Ю. «Неклассическая» структурно-обусловленная акустическая нелинейность: эксперименты и модели. Учебно-методический материал по программе повышения квалификации «Новые подходы к проблемам генерации, обработки, передачи, хранения, защиты информации и их применение» / В.Ю. Зайцев, Н.В. Прончатов-Рубцов, С.Н. Гурбатов. — Нижний Новгород (Zaytsev V.Yu., Pronchatov-Rubtsov N.V., & Gurbatov S.N. «Neklassicheskaya» strukturnoobuslovlennaya akusticheskaya nelineynost: eksperimenty i modeli [«Non-classical» structurally conditioned acoustic nonlinearity: experiments and models]. *Nizhniy Novgorod* [in Russian]). — 2007. — 223 с.
- Киттель Ч. Введение в физику твёрдого тела / Ч. Киттель. — М.: Наука (Kittel Ch. *Vvedenie v fiziku tverdogo tela* [Introduction to solid state physics]. М.: Nauka [in Russian]), 1978. — 791 с.
- Гринченко В.Т. Основы акустики: Учебное пособие / В.Т. Гринченко, И.В. Вовк, В.Т. Маципура. — К.: Наукова думка (Hrynchenko V.T., Vovk Y.V., & Matsypura V.T. *Osnovy akustiki: Uchebnoe posobie* [Fundamentals of Acoustics: A Tutorial]. К.: Naukova dumka [in Russian]), 2007. — 640 с.
- Зарембо Л.К. Введение в нелинейную акустику. Звуковые и ультразвуковые волны большой интенсивности / Л.К. Зарембо, В.А. Красильников. — М.: Наука (Zaremba L.K., & Krasyl'nikov V.A. *Vvedenie v nelineynuyu akustiku. Zvukovye i ultrazvukovye*

- volny bolshoy intensivnosti [Introduction to nonlinear acoustics. High intensity sound and ultrasonic waves]. M.: Nauka [in Russian]). — 1966. — 520 с.
12. Зарембо Л.К. Нелинейные явления при распространении упругих волн в твёрдых телах / Л.К. Зарембо, В.А. Красильников // Успехи физических наук (Zaremba L.K., & Krasilnikov V.A. Nelineynye yavleniya pri rasprostraneniі uprugikh voln v tverdykh telakh [Nonlinear phenomena in the propagation of elastic waves in solids]. Uspekhi fizicheskikh nauk, [in Russian]). — 1970. — Т. 102. — Вып. 4. — С. 549—586.
 13. Волновые процессы в средах с гистерезисной нелинейностью. Часть I / В.Е. Назаров, А.В. Радостин, Л.А. Островский, И.А. Соустова // Акустический журнал (Nazarov V.Ye., Radostin A.V., Ostrovskiy L.A., & Soustova I.A. Volnovye protsessy v sredakh s gistereziy noy nelineynostyu. Chast I [Wave processes in media with hysteresis nonlinearity. Part I]. Akusticheskiy zhurnal, [in Russian]). — 2003. — Т. 49. — № 3. — С. 405—415.
 14. Волновые процессы в средах с гистерезисной нелинейностью. Часть II / В.Е. Назаров, А.В. Радостин, Л.А. Островский, И.А. Соустова // Акустический журнал (Nazarov V.Ye., Radostin A.V., Ostrovskiy L.A., & Soustova I.A. Volnovye protsessy v sredakh s gistereziy noy nelineynostyu. Chast II [Wave processes in media with hysteresis nonlinearity. Part II]. Akusticheskiy zhurnal, [in Russian]). — 2003. — Т. 49. — № 4. — С. 529—534.
 15. Зайцев В.Ю. Упругие волны в средах с нелинейной диссипацией / В.Ю. Зайцев, В.Е. Назаров // Акустический журнал (Zaytsev V.Yu., & Nazarov V.Ye. Uprugie volny v sredakh s nelineynoy dissipatsiyey [Elastic waves in media with nonlinear dissipation]. Akusticheskiy zhurnal, [in Russian]). — 1998. — Т. 44. — № 3. — С. 362—368.
 16. Зайцев В.Ю. Уравнение состояния микрогетерогенных сред и частотная зависимость их упругой нелинейности / В.Ю. Зайцев, В.Е. Назаров, И.Ю. Беляева // Акустический журнал (Zaytsev V.Yu., Nazarov V.Ye., & Belyaeva I.Yu. Uravneniye sostoyaniya mikrogheterogennykh sred i chastotnaya zavisimost ikh uprugoy nelineynosti [The equation of state for microinhomogeneous media and the frequency dependence of their elastic nonlinearity]. Akusticheskiy zhurnal, [in Russian]). — 2001. — Т. 47. — № 2. — С. 220—226.
 17. Зайцев В.Ю. О диссипативных и дисперсионных свойствах микрогетерогенных сред / В.Ю. Зайцев, В.Е. Назаров, А.Е. Шульга // Акустический журнал (Zaytsev V.Yu., Nazarov V.Ye., & Shulga A.Ye. O dissipativnykh i dispersionnykh svoystvakh mikrogheterogennykh sred [Dissipative and dispersion properties of microinhomogeneous media]. Akusticheskiy zhurnal [in Russian]). — 2000. — Т. 46. — № 3. — С. 348—355.
 18. Беляева И.Ю. О предельном значении параметра упругой нелинейности структурно неоднородных сред / И.Ю. Беляева, Зайцев В.Ю. // Акустический журнал (Belyaeva I.Yu., & Zaytsev V.Yu. O predelnom znachenii parametra uprugoy nelineynosti strukturno neodnorodnykh sred [On the limiting value of the elastic nonlinearity parameter of structurally inhomogeneous media]. Akusticheskiy zhurnal [in Russian]). — 1998. — Т. 44. — № 6. — С. 731—737.
 19. Патент № 17425 А. Україна. МПК G01N 29/00. Спосіб оцінки нелінійності акустичного тракту і пристрій для його здійснення. — Державна академія легкої промисловості України; Скрипник Ю.О., Лісовець С.М. — № 94063007; Заявл. 27.06.1994; Опубл. 06.05.1997, Бюл. № 5 (Skrypnyk, Yu.O., & Lisovets, S.M., inventors. (1994). Sposib otsinky nelineynosti akustichnoho traktu i prystrii dlia yoho zdiisnennia [The method of estimating the nonlinearity of the acoustic path and device for its implementation]. Ukrainian patent, no. 17425 A).
 20. Патент № 34594 А. Україна. МПК G01N 5/00, G01N 29/00, G01N 29/07. Спосіб визначення залежності швидкості розповсюдження акустичних коливань від їх інтенсивності і пристрій для його здійснення. — Державна академія легкої промисловості України; Скрипник Ю.О., Лісовець С.М. — № 98052678; Заявл. 22.05.1998; Опубл. 15.03.2001, Бюл. № 2 (Skrypnyk, Yu.O., & Lisovets, S.M., inventors. (2001). Sposib vyznachennia zalezhnosti shvydkosti rozpovsiudzhennia akustichnykh kolyvan vid yikh intensyvnosti i prystrii dlia yoho zdiisnennia [The method of determining the dependence of the speed of propagation of acoustic oscillations on their intensity and device for its implementation]. Ukrainian patent, no. 34594 A).

Отримано / received: 16.12.2020.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. В.Б. Кисельовим (Україна).
Prof. V.B. Kyseliov, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.