

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Лісовець С. М., Защепкіна Н. М., Здоренко В. Г.

**УЛЬТРАЗВУКОВИЙ КОНТРОЛЬ МІЦНОСТІ
ПОЛІКРИСТАЛІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ
НЕЛІНІЙНИХ ЕФЕКТІВ**

Монографія

Рекомендовано Вченою радою КПІ ім. Ігоря Сікорського

м. Київ – 2026

*Рекомендовано Вченою радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 6 від 08.06.2026 р.)*

Рецензенти:

Ванкевич П. І., д-р техн. наук, професор
Національна академія Сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного
Плєснецов С. Ю., д-р техн. наук, доцент
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Відповідальний редактор:

Єременко В. С., д-р техн. наук, професор
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Лісовець С. М., Защепкіна Н. М., Здоренко В. Г.

Л63 Ультразвуковий контроль міцності полікристалічних матеріалів із застосуванням нелінійних ефектів. Монографія [Електронний ресурс] / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; авт.: С. М. Лісовець, Н. М. Защепкіна, В. Г. Здоренко ; за ред. Н. М. Защепкіної. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,26 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2026. – 176 с. – Назва з екрана.

В монографії розглядаються питання, присвячені: особливостям ультразвукового контролю полікристалічних матеріалів з використанням нелінійних ефектів, ультразвуковим хвилям в полікристалічних матеріалах, технічним засобам ультразвукового контролю нелінійних параметрів ультразвукової хвилі і експериментальному дослідженню міцності структурно-неоднорідних полікристалічних матеріалів. Монографія також може бути корисна всім, хто цікавиться ультразвуковим контролем із застосуванням нелінійних ефектів.

УДК 534.08:620.1:519.87

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
проспект Перемоги, 37, м. Київ, 03056
<https://kpi.ua>

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

© С. М. Лісовець, Н. М. Защепкіна, В. Г. Здоренко, 2026
© КПІ імені Ігоря Сікорського, 2026

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	7
1. ОСОБЛИВОСТІ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЮ ПОЛІКРИСТАЛІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЛІНІЙНИХ ЕФЕКТІВ.....	9
1.1. Теоретичні основи ультразвукового контролю матеріалів з використанням нелінійних ефектів	9
1.2. Аналіз сучасних методів ультразвукового контролю структурно- неоднорідних середовищ.....	17
1.3. Переваги і недоліки сучасних методів ультразвукового контролю структурно-неоднорідних середовищ	38
2. УЛЬТРАЗВУКОВІ ХВИЛІ В ПОЛІКРИСТАЛІЧНИХ МАТЕРІАЛАХ.....	43
2.1. Визначення аналітичної залежності між міцністю полікристалічних матеріалів і параметрами ультразвукових хвиль	43
2.2. Застосування рівняння стану з нелінійними функціями гістерезису тертя і гістерезису відриву.....	46
2.3. Дослідження залежності між параметрами ультразвукової хвилі і нелінійними параметрами рівняння стану.....	52
2.4. Дослідження залежності між параметрами ультразвукової хвилі і міцністю полікристалічних матеріалів	63
2.5. Застосування факторного експерименту при ультразвуковому контролі міцності полікристалічних матеріалів	65
3. ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЮ НЕЛІНІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ХВИЛІ	82
3.1. Вимоги до технічних засобів ультразвукового контролю нелінійних параметрів ультразвукової хвилі	82
3.2. Технічні засоби вимірювання швидкості c ультразвукових хвиль в структурно-неоднорідному полікристалічному матеріалі.....	83

3.3. Технічні засоби вимірювання абсолютної зміни Δc швидкості c ультразвукових хвиль в структурно-неоднорідному полікристалічному матеріалі	92
3.4. Технічні засоби вимірювання відносної зміни $\Delta c/c$ швидкості c ультразвукових хвиль в структурно-неоднорідному полікристалічному матеріалі	99
3.5. Технічні засоби вимірювання відносної зміни $\Delta K/K$ коефіцієнта поглинання K ультразвукових хвиль в структурно-неоднорідному полікристалічному матеріалі.....	104
3.6. Технічні засоби вимірювання відносної зміни $\Delta K/K$ коефіцієнта поглинання K ультразвукових хвиль в структурно-неоднорідному полікристалічному матеріалі з двонаправленим послаблювачем.....	109
4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ СТРУКТУРНО-НЕОДНОРІДНИХ ПОЛІКРИСТАЛІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ	117
4.1. Експериментальна установка для визначення нелінійних параметрів ультразвукової хвилі	117
4.2. Розрахунок і вибір параметрів електроультра звукового тракту випромінювання/приймання	119
4.3. Оцінювання похибок вимірювального перетворення	136
4.4. Результати вимірювального контролю межі міцності на розрив σ_B полікристалічних матеріалів	151
ВИСНОВКИ.....	156
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	158
ДОДАТКИ.....	164

ВСТУП

В різних галузях промисловості значний обсяг продукції становлять вироби з полікристалічних матеріалів, такі як штамповані деталі, труби теплообмінників, високонавантажена арматура, вкладиші до підшипників, зубчасті колеса тощо. Під час виготовлення і експлуатації таких виробів необхідно контролювати їхні міцнісні характеристики, до яких належать межа міцності, межа пружності, межа текучості і деякі інші.

Серед них однією з найважливіших є межа міцності на розрив σ_B : важливість цієї характеристики зумовлена тим, що при перевищенні зусилля, прикладеного до виробу, вище зазначеної межі, відбувається його руйнування, що може призвести до небажаних наслідків.

Існують різні методи контролю, які дозволяють контролювати межу міцності на розрив σ_B шляхом руйнування виробу – проте в багатьох випадках це є неприйнятним через високу вартість виробу або загрозу життю людей. Існують також методи неруйнівного контролю [13, 60] (наприклад, електромагнітні методи, методи вимірювання твердості або ультразвукові методи), які дозволяють контролювати межу міцності на розрив σ_B без руйнування контрольованого виробу [11, 12], однак вони часто не забезпечують необхідних значень достовірності контролю і похибок вимірювань. Оскільки вимоги до підвищення достовірності контролю і зменшення похибок вимірювань постійно зростають, виникає необхідність розробки нових неруйнівних методів і засобів вимірювального контролю.

Монографія присвячена розвитку ультразвукових засобів неруйнівного контролю полікристалічних матеріалів з використанням нелінійних ефектів розповсюдження ультразвукових хвиль. Ультразвукові нелінійні ефекти найбільш сильно проявляються в «м'яких» полікристалічних матеріалах, таких як мідь, цинк, латунь або бронза, оскільки такі матеріали характеризуються структурною ультразвуковою нелінійністю.

Така нелінійність звичайно пояснюється тим, що на межах між монокрис-

талами (які є більш «м'якими» в порівнянні з самими монокристалами) під час проходження скрізь них ультразвукових хвиль великої інтенсивності спостерігаються екстремально високі відносні деформації, що призводить до спотворення форми ультразвукової хвилі і зміни її параметрів. Контролювати межу міцності на розрив σ_B можна за наявності однозначних функціональних залежностей між параметром σ_B і ультразвуковими нелінійними параметрами ультразвукової хвилі.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

∇ – оператор набла (оператор Гамільтона).

α – нелінійний параметр.

β – нелінійний параметр.

Γ – коефіцієнт нелінійності.

$\Gamma^{(n)}$ – коефіцієнт нелінійності n -го порядку.

γ – нелінійний параметр.

Δ – оператор Лапласа.

ΔK – абсолютна зміна коефіцієнта поглинання ультразвукової хвилі в середовищі.

Δc – абсолютна зміна швидкості розповсюдження ультразвукової хвилі в середовищі.

δ – декремент загасання.

ε – відносна деформація.

ε_m – амплітуда відносної деформації.

ζ – коефіцієнт об'ємної в'язкості.

η – коефіцієнт зсувної в'язкості.

λ – довжина ультразвукової хвилі.

μ – модуль всебічного зсуву.

ν – концентрація дефектів.

ξ – зсув.

ρ – густина середовища.

ρ_0 – рівноважна густина середовища.

ρ' – збурення густини середовища.

σ – механічне напруження.

Φ – загальне визначення функції.

ω – колова частота.

A – нелінійний модуль пружності третього порядку.

B – нелінійний модуль пружності третього порядку.

b – вектор Бюргерса.

C – нелінійний модуль пружності третього порядку.

c – швидкість розповсюдження ультразвукової хвилі в середовищі.

d – діаметр.

E – лінійний модуль пружності (модуль Юнга).

f – частота.

g – коефіцієнт в'язкості.

H – відстань.

i – індекс.

j – індекс.

K – коефіцієнт поглинання.

k – індекс.

L – довжина.

l – індекс.

M – маса.

m – індекс.

N – кількість.

n – індекс.

p – тиск в середовищі.

p_0 – рівноважний тиск в середовищі.

p' – збурення тиску в середовищі.

Q – добротність.

q – коефіцієнт «м'якості» дефектів-включень.

S – ентропія.

t – час.

U – вектор зсуву.

u – коливальна швидкість.

V – об'єм.

X – координата.

x – координата.

Y – координата.

y – координата.

Z – координата.

z – координата.

1. ОСОБЛИВОСТІ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЮ ПОЛІКРИСТАЛІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЛІНІЙНИХ ЕФЕКТІВ

1.1. Теоретичні основи ультразвукового контролю матеріалів з використанням нелінійних ефектів

Пружні нелінійні властивості газоподібних, рідких і твердих середовищ, а також пружні (ультразвукові) нелінійні хвилі в таких середовищах вже досить давно вивчаються в межах сформованого наукового напрямку – нелінійного ультразвуку [4]. В результаті багаторічних досліджень було встановлено, що макроскопічні тіла (зокрема і структурно-неоднорідні середовища) мають два основні види ультразвукової нелінійності.

В класичній роботі [1] показано, що для деформованого середовища його пружні властивості визначаються розкладанням в ряд внутрішньої енергії за інваріантами тензора деформації, що пов'язано з нелінійністю сил міжатомної (або міжмолекулярної) взаємодії. Лінійними модулями пружності є коефіцієнти при квадратичних членах розкладання, а нелінійними модулями пружності (модулями Ландау, або модулями третього порядку) – коефіцієнти при кубічних членах розкладання. Такий вид ультразвукової нелінійності має назву «фізична нелінійність».

Також в одній з класичних робіт [4] показано, що зв'язок між компонентами тензора деформацій і похідними від компонент вектора зсуву за координатами є нелінійним. Цей зв'язок не залежить від властивостей конкретного досліджуваного макроскопічного тіла, а визначається лише його рівнянням стану. Такий вид ультразвукової нелінійності має назву «геометрична нелінійність». Однією з обов'язкових умов застосовності фізичної і геометричної нелінійностей є відсутність в контрольованому середовищі розривів [2], що в загальному випадку описується за допомогою системи з трьох рівнянь (1.1) – (1.3):

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \nabla) \vec{u} \right) = -\nabla \rho + \eta \Delta \vec{u} + \left(\zeta + \frac{\eta}{3} \right) \text{grad div } \vec{u}, \quad (1.1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{u}) = 0, \quad (1.2)$$

$$p = p(\rho), \quad (1.3)$$

де p – тиск в середовищі; ρ – густина середовища; $\vec{u}$ – коливальна швидкість; η – коефіцієнт зсувної в'язкості; ζ – коефіцієнт об'ємної в'язкості.

В системі рівнянь (1.1) – (1.3) не показано зміну ентропії S , врахування якої в загальному випадку на застосовність фізичної і геометричної нелінійностей не впливає. Незбурений стан середовища відповідає умовам

$$p = p_0, \quad \rho = \rho_0, \quad \vec{u} = 0, \quad (1.4)$$

де p_0 – рівноважний тиск в середовищі; ρ_0 – рівноважна густина середовища.

Тобто, умови (1.4) передбачають, що пружна хвиля через контрольоване середовище не розповсюджується, і на неї не діють зовнішні механічні напруження. Навпаки, при розповсюдженні пружної хвилі через контрольоване середовище відбувається збурення як тиску, так і густини середовища. Для відображення збурень в середовищі передбачається, що

$$p = p_0 + p', \quad \rho = \rho_0 + \rho', \quad \frac{p'}{p_0} \sim \frac{\rho'}{\rho_0} \ll 1, \quad (1.5)$$

де p' – збурення тиску в середовищі; ρ' – збурення густини середовища.

Також передбачається, що коливальна швидкість $\vec{u}$ значно менша за швидкість розповсюдження пружної хвилі в незбуреному середовищі c_0 :

$$\frac{|\vec{u}|}{c_0} \ll 1. \quad (1.6)$$

Врахування в рівняннях (1.1) і (1.2) малих членів порядку $(|\vec{u}|/c_0)^2$ призводить до модифікації, відповідно, рівняння руху (1.1) і рівняння безперервності (1.2):

$$\rho_0 \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \nabla p' - \eta \Delta \vec{u} - \left(\zeta + \frac{\eta}{3} \right) \operatorname{grad} \operatorname{div} \vec{u} = -\rho' \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} - (\rho_0 + \rho') (\vec{u} \nabla) \vec{u}, \quad (1.7)$$

$$\frac{\partial \rho'}{\partial t} + \rho_0 \operatorname{div} \vec{u} = -\operatorname{div}(\rho' \vec{u}). \quad (1.8)$$

В лівих частинах рівнянь (1.7) і (1.8) зібрано знаходяться лінійні члени, а в правих частинах – нелінійні члени. Оскільки поява нелінійних членів зумовлюється нелінійністю рівнянь (1.1) і (1.2), а не властивостями середовища, то рівняння (1.7) і (1.8) є характерним прикладом прояву геометричної нелінійності [3]. Врахування малих членів в рівнянні (1.3) призводить до модифікації рівняння стану (1.3):

$$p' = c_0^2 \rho' + \frac{I}{2} \left(\frac{\partial^2 p}{\partial \rho^2} \right) (\rho')^2 + \dots \quad (1.9)$$

Оскільки поява нелінійних членів в правій частині рівняння (1.9) зумовлена нелінійною залежністю між збуренням тиску і збуренням густини, то рівняння (1.9) є характерним прикладом прояву фізичної нелінійності [4]. Для однорідних (або тих, що мають незначний рівень неоднорідності) макроскопічних твердих тіл рівняння руху ускладнюється і в загальному випадку має наступний вигляд:

$$\rho_0 \frac{\partial^2 U_i}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_k^2} \sigma_{ik}, \quad (1.10)$$

де U_i – вектор зсуву; σ_{ik} – тензор напружень; i, k – індекси.

Зв'язок тензора напружень σ_{ik} і тензора деформацій e_{ik} для макроскопічних твердих тіл має наступний вигляд [5]:

$$\sigma_{ik} = K e_{ll} \delta_{ik} + 2\mu \left(e_{ik} - \frac{I}{3} \delta_{ik} e_{ll} \right) + O(e_{ik}^2), \quad (1.11)$$

де K – модуль всебічного стискання; μ – модуль зсуву; $O(e_{ik}^2)$ – поправка, яка описує відхилення від лінійного закону Гука; l – індекс.

Тензор деформацій e_{ik} , своєю чергою, також має наступний вигляд [4]:

$$e_{ik} = \frac{I}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_k} + \frac{\partial U_k}{\partial x_i} + \frac{\partial U_l}{\partial x_k} \frac{\partial U_l}{\partial x_i} \right). \quad (1.12)$$

Поправка $O(e_{ik}^2)$ включає нелінійні члени і має наступний вигляд [4]:

$$\begin{aligned}
O(e_{ik}^2) = & \left(\mu + \frac{A}{4} \right) \left(\frac{\partial U_l}{\partial x_i} \frac{\partial U_l}{\partial x_k} + \frac{\partial U_i}{\partial x_l} \frac{\partial U_k}{\partial x_l} + \frac{\partial U_l}{\partial x_k} \frac{\partial U_i}{\partial x_l} \right) + \\
& + \frac{I}{2} \left(K - \frac{2}{3} \mu + B \right) \left(\frac{\partial U_l}{\partial x_m} \frac{\partial U_l}{\partial x_m} \delta_{ik} + 2 \frac{\partial U_i}{\partial x_k} \frac{\partial U_l}{\partial x_l} \right) + \\
& + \frac{A}{4} \frac{\partial U_k}{\partial x_l} \frac{\partial U_l}{\partial x_i} + B \left(\frac{\partial U_l}{\partial x_m} \frac{\partial U_m}{\partial x_l} \delta_{ik} + 2 \frac{\partial U_k}{\partial x_i} \frac{\partial U_l}{\partial x_l} \right) + C \frac{\partial U_l}{\partial x_l} \frac{\partial U_l}{\partial x_l} \delta_{ik},
\end{aligned} \tag{1.13}$$

де A , B , C – нелінійні модулі пружності третього порядку.

Модулі пружності третього порядку визначаються за допомогою розкладання внутрішньої енергії E_E твердого тіла за ступенями тензора деформацій [5]:

$$E_E = \mu e_{ik}^2 + \left(\frac{K}{2} - \frac{\mu}{3} \right) e_{ll}^2 + \frac{A}{3} e_{ik} e_{il} e_{kl} + B e_{ik}^2 e_{ll} + \frac{C}{3} e_{ll}^3. \tag{1.14}$$

Ультразвуковий контроль середовищ із використанням фізичної і геометричної нелінійностей має низку недоліків, основним з яких є те, що для такого контролю необхідні значні деформації середовища і, відповідно, великі інтенсивності ультразвукових хвиль. Крім того, такий контроль не завжди можливо здійснити через неможливість забезпечення необхідної потужності випромінювання, додатковий небажаний нагрів середовища внаслідок значного поглинання енергії ультразвукових хвиль, відсутність необхідних потужних випромінювачів ультразвукових хвиль тощо. Проте, протягом останніх десятиліть було виявлено широкий клас так званих структурно-неоднорідних середовищ, ультразвукова нелінійність яких демонструє надзвичайно високий рівень (порівняно з однорідними середовищами або середовищами з незначним рівнем неоднорідності), а структура середовища (якщо середовище є макроскопічним твердим тілом) характеризується наявністю різноманітних дефектів, таких як дислокації, границі зерен, пори, тріщини, розшарування тощо [6].

Звичайно такі середовища умовно поділяють на класи залежно від характеру переважаючих в них дефектів: мікронеоднорідні, гранульовані, флюїдонасичені, тріщинуваті, пористі середовища тощо. Інколи структурно-неоднорідні середовища визначають за видом матеріалу, з якого вони складаються: деякі

«м'які» полікристалічні метали, багато гірських порід, певні будівельні матеріали тощо. В зв'язку з постійно здійснюваними дослідженнями перелік таких структурно-неоднорідних середовищ постійно розширюється.

Як свідчать результати численних досліджень, саме дефекти, такі як дислокації, границі зерен, пори, тріщини, розшарування тощо визначають нелінійні ультразвукові властивості структурно-неоднорідних середовищ. Сам матеріал «основи» таких середовищ практично не вносить нелінійних ультразвукових спотворень при розповсюдженні крізь нього ультразвукових хвиль середньої або навіть великої інтенсивності [7].

В структурно-неоднорідних середовищах різних класів часто спостерігаються сильно виражені нелінійні ультразвукові ефекти при інтенсивності ультразвукових хвиль приблизно $(0,1 \dots 1,0) \text{ Вт} / \text{см}^2$ і навіть менше (на відміну від середовищ практично без дефектів, де для спостереження нелінійних ультразвукових ефектів за рахунок геометричної і фізичної нелінійностей потрібні інтенсивності ультразвукових хвиль приблизно $(1 \dots 100) \text{ Вт} / \text{см}^2$ і навіть більше) [8]. Така поведінка структурно-неоднорідних середовищ відкриває широкі можливості для розвитку засобів ультразвукового контролю, зокрема і нелінійного, які мають певні переваги порівняно з іншими існуючими методами контролю: більшу роздільну здатність, більшу чутливість тощо.

В більшості випадків для опису ультразвукових властивостей структурно-неоднорідних середовищ використовуються рівняння стану, аналогічні рівнянням стану (1.3) або (1.9). При цьому також використовуються різні види залежностей між механічним напруженням σ і відносною деформацією ε . Залежно від виду цієї залежності $\sigma(\varepsilon)$ структурно-неоднорідного середовища визначається вид його ультразвукової нелінійності: реактивна (пружна), дисипативна (непружна), білінійна або гістерезисна, а також деякі їх різновиди [4].

Реактивна (пружна) нелінійність є парною (для квадратичної нелінійності) і аналітичною функцією відносної деформації ε . Звичайно параметри такої нелінійності від частоти f ультразвукової хвилі не залежать або залежать не-

значно. Дисипативна (непружна) нелінійність є непарною (для квадратичної нелінійності) і неаналітичною функцією загального вигляду, яка залежить від відносної деформації ε і швидкості відносної деформації $\dot{\varepsilon}$. Звичайно параметри такої нелінійності від частоти f ультразвукової хвилі залежать прямо пропорційно. Білінійна нелінійність є неаналітичною функцією загального вигляду, яка залежить від відносної деформації ε і швидкості відносної деформації $\dot{\varepsilon}$, а також від знаку відносної деформації $\text{sign}(\varepsilon)$. Звичайно параметри такої нелінійності від частоти f ультразвукової хвилі не залежать або залежать незначно. Гістерезисна нелінійність є неаналітичною функцією загального вигляду, що залежить не лише від відносної деформації ε і швидкості відносної деформації $\dot{\varepsilon}$, але і від знаку відносної деформації $\text{sign}(\varepsilon)$ та від знаку швидкості зміни відносної деформації $\text{sign}(\dot{\varepsilon})$. Звичайно параметри такої нелінійності від частоти f ультразвукової хвилі не залежать або залежать незначною мірою.

Наведені вище види ультразвукових нелінійностей як якісно, так і кількісно відрізняються один від одного, що зумовлено різними причинами виникнення цих видів нелінійностей [9]. Для багатьох видів матеріалів, з яких складаються структурно-неоднорідні середовища («м'які» полікристалічні метали, гірські породи, будівельні матеріали), залежність $\sigma(\varepsilon)$ є квадратичною. Рідше ця залежність $\sigma(\varepsilon)$ є або кубічною, або дробово-ступеневою. Проте випадок квадратичної залежності $\sigma(\varepsilon)$ є найбільш типовим (принаймні, для багатьох «м'яких» полікристалічних матеріалів), трапляється найчастіше і, внаслідок цього, становить найбільший інтерес з точки зору проведення ультразвукового контролю з використанням нелінійних ефектів.

Все вищезазначене стосовно видів ультразвукових нелінійностей дозволяє, підбираючи відповідні умови проведення експерименту, здійснювати контроль лише тих видів дефектів структурно-неоднорідних середовищ, які пов'язані з певним видом ультразвукової нелінійності або найбільше впливають на такий вид ультразвукової нелінійності.

Значний інтерес представляє оцінка рівнів ультразвукових нелінійностей усіх чотирьох видів, наведених вище, оскільки вони безпосередньо впливають на поріг чутливості і роздільну здатність під час ультразвукового контролю структурно-неоднорідних середовищ. Це питання детально розглянуто в роботі [9], де представлено узагальнений механізм зростання ультразвукової нелінійності структурно-неоднорідних середовищ.

В ній показано, що за всього розмаїття класів структурно-неоднорідних середовищ (мікронеоднорідні, гранульовані тощо) вони мають спільну особливість, яка зумовлює їхні ультразвукові нелінійні властивості, а саме: наявність в їхній структурі принаймні двох компонентів із лінійними модулями пружності, що значно відрізняються. Наприклад, для полікристалічних матеріалів це можуть бути зерна (перший компонент) і границі між зернами (другий компонент).

Тому механізм зростання ультразвукової нелінійності структурно-неоднорідних середовищ можна сформулювати так: наявність в структурі таких середовищ «м'яких» дефектів може призводити до виникнення в локальних областях структури екстремально високих значень механічних напружень і деформацій.

Це, за умови не надто малої концентрації таких «м'яких» дефектів, означає появу значної ультразвукової нелінійності, при цьому власна ультразвукова нелінійність «м'яких» дефектів і «жорсткої» основи може бути незначною або практично повністю відсутньою. Також в роботі [9] показано, що максимальний рівень зростання ультразвукової нелінійності структурно-неоднорідних середовищ обмежується максимально можливим співвідношенням між значеннями лінійних модулів пружності «м'яких» дефектів і «жорсткої» основи.

В основі такого положення є заміна лінійного закону Гука, що має вигляд

$$\sigma(\varepsilon) = E\varepsilon, \quad (1.15)$$

на нелінійний закон, що має вигляд

$$\sigma(\varepsilon) = E\left(\varepsilon + \varepsilon^n \Gamma^{(n)}\right), \quad (1.16)$$

де σ – механічне напруження; E – модуль Юнга; ε – відносна деформація; $\Gamma^{(n)}$ – безрозмірний нелінійний параметр n -го порядку.

Порядок n нелінійного параметра $\Gamma^{(n)}$ визначався шляхом спільного проведення розрахунків і експериментів. Наприклад, згідно з результатами роботи [10] встановлені значення нелінійного параметра $\Gamma^{(2)}$ досягають значення $10^3 \dots 10^5$, а значення нелінійного параметра $\Gamma^{(3)}$ досягають значення $10^5 \dots 10^8$ в широкому діапазоні частот ультразвукових хвиль від декількох герц до декількох мегагерц.

Крім того, в роботі [10] було показано, що можливе додаткове збільшення рівня ультразвукової нелінійності структурно-неоднорідних середовищ за рахунок резонансного збудження «м'яких» дефектів. При цьому, в силу своєї «м'якості», власні частоти резонансу таких дефектів є досить низькими. Проте на частотах, близьких до частот резонансу «м'яких» дефектів як в більшу, так і в меншу сторону, відбувається значний зсув фази коливань «м'яких» дефектів відносно фази коливань «жорсткої» основи, внаслідок чого стає проблематичним характеризувати ультразвукову нелінійність структурно-неоднорідного середовища статичним співвідношенням «напруження-деформація» (1.16).

В такому випадку необхідно, наприклад, враховувати характер пружних коливань на вищих гармоніках або комбінаційних частотах, а також зіставляти резонансний нелінійний відгук з аналогічним нелінійним відгуком в області частот, віддалених від резонансних. Це, своєю чергою, призводить до ускладнення ультразвукового нелінійного контролю і зниження його достовірності. Згідно з результатами роботи [10], на максимальний рівень ультразвукової нелінійності будь-якого структурно-неоднорідного середовища, зокрема і полікристалічних матеріалів, накладено фізичну межу, зумовлену обмеженням максимального співвідношення між значеннями лінійних модулів пружності «м'яких» дефектів і «жорсткої» основи. Ця фізична межа визначається атомарною структурою макроскопічних тіл і обмежується приблизно 4...5 порядками.

1.2. Аналіз сучасних методів ультразвукового контролю структурно-неоднорідних середовищ

В теперішній час існують методи контролю фізико-механічних властивостей структурно-неоднорідних середовищ, в основу яких покладено використання різних ультразвукових нелінійних ефектів. При їх застосуванні проводиться аналіз ультразвукових нелінійних моделей структурно-неоднорідних середовищ, оцінюються можливості досягнення максимальної роздільної здатності, максимальної чутливості тощо, а також забезпечення необхідної достовірності контролю.

В одній з перших робіт [2] з ультразвукового нелінійного контролю структурно-неоднорідних середовищ розглядалися середовища з ієрархічною структурою дефектів. Така структура передбачала, що до складу «м'якого» дефекту можуть входити інші, на декілька порядків менші, «м'які» дефекти – і так на декількох вкладених рівнях ієрархії. Щодо конструкційних полікристалічних матеріалів, то на першому рівні ієрархії дефектів могли розглядатися границі між зернами, а на другому рівні – границі між субзернами. Залежність між механічним напруженням $\sigma(\varepsilon)$ і відносною деформацією ε було представлено в наступному вигляді

$$\sigma(\varepsilon) = E\varepsilon(1 + \gamma\varepsilon + \beta\varepsilon^2 + \dots), \quad (1.17)$$

де E – лінійний модуль пружності (модуль Юнга); γ – квадратичний нелінійний параметр; β – кубічний нелінійний параметр.

Таке середовище розглядалося як довгий ланцюжок із зосередженими масами M , з'єднаними пружними елементами (пружинками), незбурена довжина L яких передбачалася однаковою і в багато разів меншою за довжину пружної хвилі λ , як наведено на рис. 1.1.

Було зроблено припущення, що частина пружних елементів (пружинок) має коефіцієнт пружності k_l значно менший, ніж коефіцієнт пружності k в основної частини пружинки, тобто $k/k_l = Q \gg 1$. Лінійна густина комірок ланцю-

жка характеризувалася величиною N , а концентрація «м'яких» дефектів – величиною N_l .

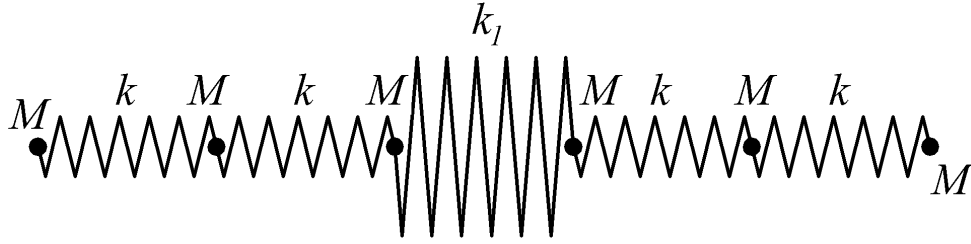


Рис. 1.1. Структурно-неоднорідне середовище з ієрархічною структурою дефектів

Також вважалось, що матеріал кожного пружного елемента (пружинки) характеризується малим відхиленням від лінійного закону Гука за допомогою поправок $f(\varepsilon)$ і $f_l(\varepsilon)$:

$$\sigma(\varepsilon) = E\varepsilon(1 + f(\varepsilon)), \quad (1.18)$$

$$\sigma(\varepsilon) = E_l\varepsilon(1 + f_l(\varepsilon)), \quad (1.19)$$

де E , E_l – лінійні модулі пружності матеріалу пружинок, зокрема $f(\varepsilon) \sim f_l(\varepsilon) \ll 1$.

Окрім цього, передбачалося, що поправки $f(\varepsilon)$ і $f_l(\varepsilon)$ мають ступеневий характер:

$$f(\varepsilon) = f_l(\varepsilon) = \varepsilon^{n-l} \Gamma^{(n)}, \quad (1.20)$$

де $\Gamma^{(n)}$ – безрозмірний нелінійний параметр n -го порядку.

Для визначення залежності між механічним напруженням σ і відносною деформацією ε за концентрації ζ дефектів було отримано наступне співвідношення:

$$\sigma(\varepsilon) = \varepsilon B E \left(1 + \varepsilon^{n-l} A \Gamma^{(n)} \right), \quad (1.21)$$

де коефіцієнти

$$A = \frac{1 + \zeta(Q^n - 1)}{(1 + \zeta(Q - 1))^n}, \quad (1.22)$$

$$B = (1 + \zeta(Q - 1))^{-l}. \quad (1.23)$$

Також в роботі [2] було показано, що значення нелінійного параметра $\Gamma^{(n)}$ проходить через максимум, який досягається за достатньо малої концентрації дефектів $\zeta_{\text{опт}}$:

$$\zeta_{\text{опт}} = (n-1)^{-1} (Q-1)^{-1} - n(n-1)^{-1} (Q^n-1)^{-1} \ll 1. \quad (1.24)$$

Зі збільшенням же концентрації дефектів ζ коефіцієнт A після проходження максимуму $\zeta_{\text{опт}}$ різко зменшується і прямує до 1 .

Отже, контроль дефектів досить малої концентрації з високою роздільною здатністю дає можливість контролювати фізико-механічні властивості полікристалічних матеріалів, розглядаючи як «м'які» дефекти границі між зернами і субзернами. Однак, різке зменшення до 1 коефіцієнта A при збільшенні концентрації дефектів, що характерно для полікристалічних матеріалів [4], дозволяє стверджувати про суттєве зменшення роздільної здатності зі збільшенням концентрації дефектів, що є недоліком даного методу ультразвукового нелінійного контролю.

Також в одній з перших робіт [1] розглядалися структурно-неоднорідні середовища з дисипацією енергії, в яких дефекти середовища зазнавали нелінійного тертя внаслідок контакту між собою. Під час проходження через таке середовище ультразвукова хвиля не тільки спотворювалася (нелінійність мала реактивний характер), але і інтенсивно згасала (нелінійність мала дисипативний характер).

Таке середовище розглядалося як ланцюжок із зосередженими масами M і пружними елементами (пружинками), паралельно до яких додавали дисипативні елементи, як показано на рис. 1.2. Окремим ланкам такого ланцюжка зіставлялися певні «м'які» дефекти. Щодо конструкційних полікристалічних матеріалів, це могли бути границі між зернами. Для опису нелінійної складової залежності між механічним напруженням σ і відносною деформацією ε було обрано ступеневу апроксимацію у вигляді

$$\sigma(\varepsilon) = \gamma |\dot{\varepsilon}|^m, \quad (1.25)$$

де γ , m – нелінійні параметри.

За значення нелінійного параметра $m > 0$ в'язкість середовища зі збільшенням швидкості $\dot{\epsilon}$ відносної деформації збільшувалася, за значення $m < 0$ зменшувалася, за значення $m = 0$ спостерігалася «сухе» тертя [4].

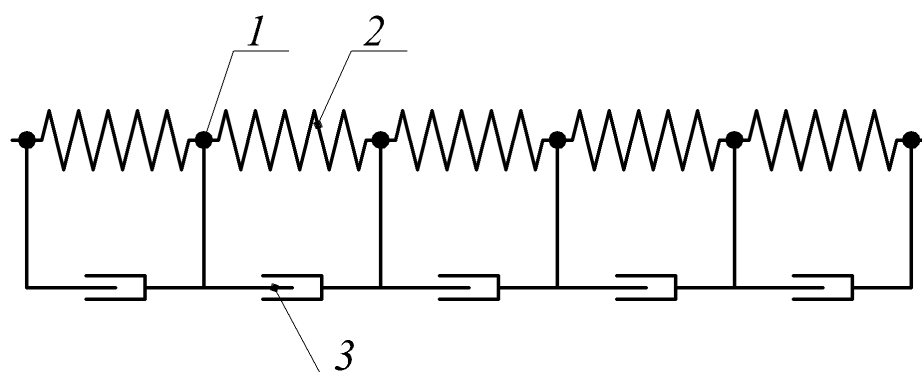


Рис. 1.2. Структурно-неоднорідне середовище з нелінійною дисипацією енергії:
1 – маса; 2 – пружний елемент; 3 – дисипативний елемент

Отже, збільшення швидкості $\dot{\epsilon}$ відносної деформації середовища може призводити як до збільшення загасання ультразвукової хвилі, так і до його зменшення, що надає можливість контролювати фізико-механічні властивості полікристалічних матеріалів, припускаючи залежність нелінійного параметра m від властивостей границь між зернами. Однак, сильна залежність нелінійного параметра m від додаткових факторів впливу (наприклад, температури навколишнього середовища), характерна для полікристалічних матеріалів, зумовлює значне збільшення похибки вимірювання, що є недоліком даного методу ультразвукового нелінійного контролю.

В роботі [10] розглядалися структурно-неоднорідні середовища з дефектами у вигляді тріщин. Показано, що нелінійне спотворення ультразвукової хвилі зумовлене контактними явищами в місцях розриву суцільності такого середовища, тобто за наявності в ньому тріщин. Схема проведення експериментів з дослідження структурно-неоднорідних середовищ із тріщиноподібними дефектами наведена на рис. 1.3.

Як характерний зразок використовувалися стрижні з дюралюмінію, що мали довжину $D = 91$ см і діаметр $d = 10$ мм, при цьому експериментальна установка допускала дослідження і інших видів конструкційних полікристалічних матеріалів. В одному зі стрижнів посередині було зроблено тріщину, а ін-

ший стрижень використовувався як контрольний зразок. Тріщина являла собою пропил в діаметральній площині глибиною $3,8\text{ мм}$ і шириною $0,3\text{ мм}$, причому під час проведення експериментів пропил заповнювався сталевими пластинками завтовшки $0,1\text{ мм}$ кожна з додаванням машинного мастила.

Під час проведення експериментів спостерігалася модуляція високочастотних крутильних пружних хвиль низькочастотними згинальними пружними хвилями. На прикладі стрижнів з дюралюмінію було показано, що потрапляння рідини в тріщини може змінити значення модуляції на $(5 \dots 6)\text{ дБ}$ і більше.

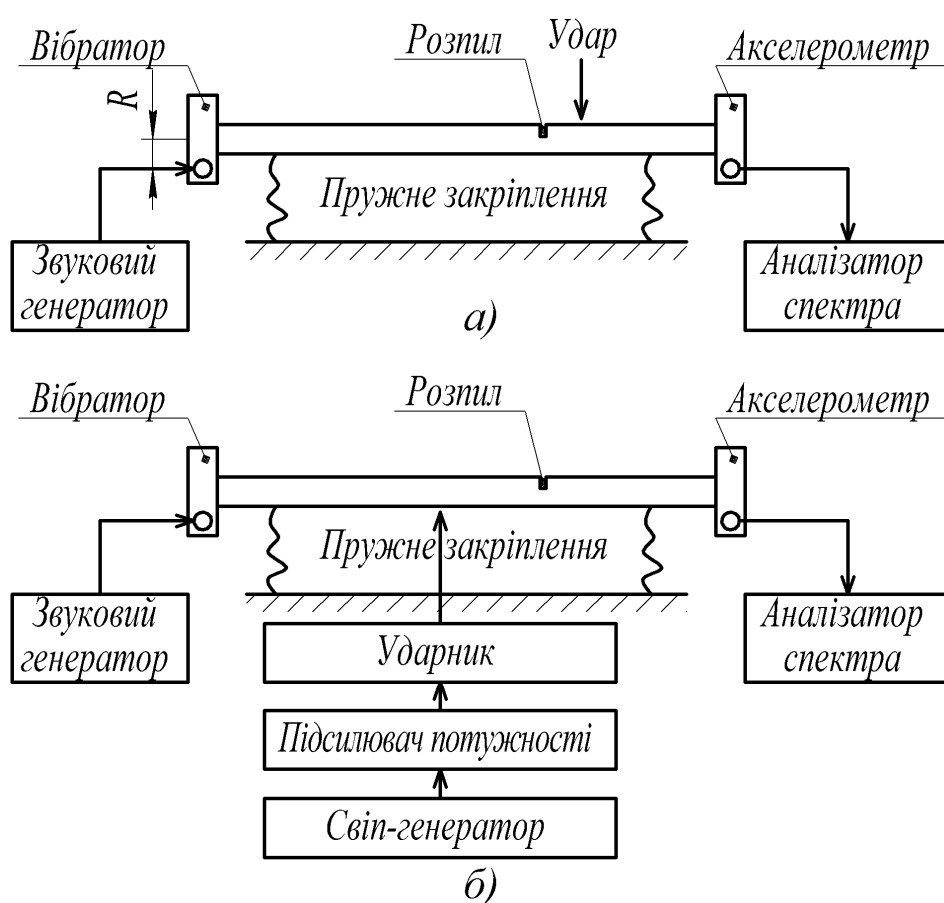


Рис. 1.3. Схема проведення експериментів з дослідження структурно неоднорідного середовища з тріщиноподібним дефектом: а) удар молотком; б) удар вібратором

Отже, зміна стану тріщиноподібного дефекту внаслідок потрапляння рідини або газу між стінками тріщини змінює значення модуляції високочастотних хвиль низькочастотними хвилями, що надає можливість контролювати фізико-механічні властивості полікристалічних матеріалів, розглядаючи зерна як стінки тріщини, а границю між зернами – як внутрішню порожнину тріщини.

Однак, недостатньо стабільне значення модуляції ультразвукових хвиль одного виду ультразвуковими хвилями іншого виду призводить до суттєвого збільшення похибок вимірювання, що є недоліком даного методу ультразвукового нелінійного контролю.

Також в одній з робіт розглядалися структурно-неоднорідні середовища, які мають дефекти у вигляді тріщин, частково заповнених рідиною або газом. В цій роботі було показано, що спотворення ультразвукової хвилі зумовлюється нелінійною залежністю між капілярним тиском в рідині і тиском газу над рідиною, з одного боку, і відстанню між стінками тріщини, з іншого боку.

Для квадратичного нелінійного параметра γ було отримано наступний вираз:

$$\gamma = \frac{3\zeta E \beta}{7} \frac{5 - 9\eta + 11\eta^2 + 9\eta^3}{(1 - 2\eta)(1 + \eta)}, \quad (1.26)$$

де ζ – концентрація тріщин; β – додатковий коефіцієнт; E – лінійний модуль пружності (модуль Юнга); η – коефіцієнт Пуассона.

Було показано, що максимальне значення квадратичного нелінійного параметра $\gamma_{\text{МАКС}}$ досягається за умови

$$\gamma_{\text{МАКС}} = \frac{16(5 - 9\nu + 11\eta^2 + 9\eta^3)(1 - \eta^2)^2}{105\pi(1 - 2\eta)(1 + \eta)} \frac{R^4 N_0}{H_{\text{ОПТ}}}, \quad (1.27)$$

де R – радіус тріщини; N_0 – коефіцієнт, що враховує однакову орієнтацію тріщин за кутами; $H_{\text{ОПТ}}$ – оптимальна відстань між поверхнями тріщин.

В роботі [6] також показано, що за наявності в тріщинах рідини або газу, навіть за малої концентрації тріщин ($\zeta \ll 1$), квадратичний нелінійний параметр досягає значення $\gamma \approx 10^3$, тобто таке середовище має високу чутливість до наявності дефектів.

Отже, незначна зміна кількості тріщин, частково заповнених рідиною або газом, призводить до суттєвого спотворення ультразвукової хвилі, що дає змогу контролювати фізико-механічні властивості полікристалічних матеріалів, розглядаючи зерна як стінки тріщини, а границю між зернами – як внутрішню по-

рожнину тріщини. Проте, складність визначення впливу тиску рідини і газу в тріщинах на спотворення ультразвукової хвилі призводить до значного збільшення похибки вимірювання, що є недоліком даного методу ультразвукового нелінійного контролю.

В роботі [4] розглядалися структурно-неоднорідні середовища, які мають середній розмір дефектів на декілька порядків менший за довжину ультразвукової хвилі. В ній показано, що навіть за такого розміру дефекти все одно викликають нелінійне спотворення ультразвукової хвилі. Для дослідження структурно-неоднорідного середовища було уведено дві незалежні координати – «повільна» s і «швидка» ξ .

«Повільна» координата s відстежувала зміну ультразвукової хвилі на періоді, що дорівнює періоду самої ультразвукової хвилі, а «швидка» координата ξ відстежувала зміну ультразвукової хвилі на періоді, що дорівнює середнім розмірам дефектів.

Також було показано, що на мікрорівні поведінка структурно-неоднорідного середовища підпорядковується термодинамічним законам, а на макрорівні описується усередненими хвильовими характеристиками. Отримано значення нелінійного параметра α , зумовлене розмірами дефектів такого середовища, яке характеризує зміну середнього питомого об'єму середовища в процесі навантаження:

$$\alpha = \langle V \rangle \left\langle \frac{V^3}{c^4} \right\rangle \left\langle \frac{V^2}{c^2} \right\rangle^{-\frac{2}{3}}, \quad (1.28)$$

де $\langle V \rangle$ – середній питомий об'єм середовища; c – швидкість розповсюдження пружних хвиль в середовищі.

Отже, зміна середнього питомого об'єму середовища змінює значення нелінійного параметра, що дає змогу контролювати фізико-механічні властивості полікристалічних матеріалів з дефектами, які значно менші за довжину ультразвукової хвилі, на низьких частотах. Проте складність встановлення однозначної залежності між розмірами дефектів і спотворенням ультразвукової хвилі

призводить до суттєвого збільшення похибки вимірювання, що є недоліком цього методу ультразвукового нелінійного контролю.

В роботі [2] розглядалися структурно-неоднорідні середовища, які мають ультразвукову гістерезисну нелінійність і виконані у вигляді резонаторів. В ній запропоновано струнну модель дислокацій і показано, що втрати енергії в структурно-неоднорідних середовищах можуть бути двох видів: втрати першого виду відбуваються при малих відносних деформаціях і називаються амплітудно-незалежними (лінійними) втратами – вони залежать від частоти і є наслідком непружного руху дислокацій в середовищі; втрати другого виду відбуваються при середніх і великих відносних деформаціях і називаються амплітудно-залежними (нелінійними) втратами – вони пов'язані з різною поведінкою дислокаційних петель на стадіях навантаження/розвантаження середовища.

Схема проведення експериментів з дослідження структурно-неоднорідних середовищ у вигляді резонаторів наведена на рис. 1.4.

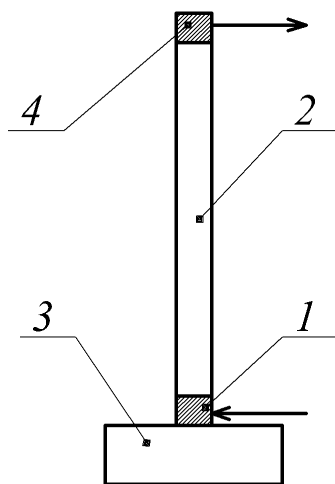


Рис. 1.4. Схема проведення експериментів з дослідження структурно-неоднорідних середовищ у вигляді резонаторів: 1 – п'єзокерамічний випромінювач;
2 – стрижневий резонатор; 3 – масивне металеве навантаження;
4 – п'єзокерамічний приймач

Застосування резонаторів зумовлене тим, що завдяки механічному резонансу збудження ультразвукових хвиль середньої і великої інтенсивності в резонаторі потребувало відносно невеликої підведеної потужності. Як характерний зразок використовували два стрижні з полікристалічного цинку квадратного перерізу зі сторонами 8 мм і довжиною 35 см, вирізані з тієї самої пласти-

ни.

Перший стрижень був контрольним і не піддавався відпалу, другий стрижень був відпалений і відпалювався протягом 50 год за температури $+350\text{ }^{\circ}\text{C}$, а вимірювання проводили за кімнатної температури. П'єзокерамічний випромінювач 1, за допомогою якого збуджували стрижневий резонатор 2, був приклеєний до масивного металевого навантаження 3. До іншого вільного торця стрижневого резонатора 2 приклеювався п'єзокерамічний приймач 4 для вимірювання амплітуди ультразвукової хвилі накачування. П'єзокерамічним випромінювачем 1 в обох стрижневих резонаторах 2 (контрольному і відпаленому) збуджувалися низькочастотні резонансні коливання на частотах перших трьох позовжніх мод: $f_1 \approx 2450\text{ Гц}$, $f_2 \approx 8250\text{ Гц}$, $f_3 \approx 13550\text{ Гц}$.

Також було показано, що залежності амплітуд відносної деформації ε_0 для стрижневих резонаторів 2 від амплітуд електричної напруги на п'єзокерамічному випромінювачі 1 є суттєво нелінійними – це свідчить про наявність в стрижневих резонаторах 2 амплітудно-залежних втрат.

В середньому, нелінійні втрати в пружній хвилі за умови $\varepsilon_0 \leq 10^{-6}$ були амплітудно-незалежними; за умови $10^{-6} \leq \varepsilon_0 \leq 10^{-5}$ спостерігалось чітко виражене нелінійне загасання пружної хвилі; за умови $10^{-5} \leq \varepsilon_0$ нелінійні втрати в пружній хвилі знову ставали амплітудно-незалежними, але більшими, ніж за умови $\varepsilon_0 \leq 10^{-5}$.

В роботі [4] також розглядалися структурно-неоднорідні середовища, які характеризуються не лише ультразвуковою гістерезисною нелінійністю, але і ультразвуковою дисипативною нелінійністю. В ній наведені результати вивчення механізму ультразвукової нелінійності двома різними способами: досліджуючи взаємодію двох ультразвукових хвиль з різними частотами і амплітудами (звичайно низькочастотної ультразвукової хвилі накачування і інформаційної високочастотної пружної хвилі) і досліджуючи самовплив пружних хвиль самих на себе (звичайно нелінійне загасання пружної хвилі).

Схема проведення експериментів була такою ж (див. рис. 1.4), як і в робо-

ті [3]. Було уведено поняття нелінійного параметра B демпфування дислокацій, залежного від їх зсуву ξ , а саме:

$$B(\xi) = B_0 \left(1 + \mu \left| \frac{\xi}{b} \right|^s \right), \quad (1.29)$$

де B_0 – коефіцієнт демпфування при малих коливаннях дислокацій; b – модуль вектора Бюргерса; s – показник ступеня; μ – нелінійний параметр, що характеризує дисипативну ультразвукову нелінійність.

Показник s ступеня міг бути як цілим числом (наприклад, $s = 2$), так і дробовим числом (наприклад, $s = 2/3$). Також показано, що основний внесок у взаємодію і самовплив ультразвукових хвиль дає дисипативна ультразвукова нелінійність, яка є високочутливою характеристикою структурно-неоднорідного середовища.

Таким чином, збільшення відносної деформації середовища призводить до чітко вираженого збільшення загасання ультразвукової хвилі, що дає можливість контролювати фізико-механічні властивості полікристалічних матеріалів в умовах, коли випромінювання ультразвукової хвилі середньої або великої інтенсивності є складною задачею. Однак збудження середовища на різних частотах резонансу часто потребує додаткової підготовки цього середовища, зокрема, розташування випромінювача і приймача у відповідних місцях, визначення необхідної моди коливань, створення елементів армування і кріплення тощо, що є недоліком даного методу ультразвукового нелінійного контролю.

В роботі [9] розглядалися реологічні структурно-неоднорідні середовища, які в широкому діапазоні частот мали практично незмінну добротність. В ній показано, що для частотної незалежності добротності структурно-неоднорідних середовищ в широкому діапазоні частот необхідна наявність на відстані L між собою невеликої кількості «м'яких» дефектів, що мають розміри H , значно менші за довжину пружної хвилі λ , і які мають досить широкий діапазон своїх пружних властивостей:

$$kH \ll 1, \quad (1.30)$$

де k – хвильове число.

Крім того, показано, що в частотному діапазоні, де добротність практично незмінна, її значення визначається головним чином геометричними особливостями «м'яких» дефектів і практично не залежить ані від в'язкості, ані від пружних властивостей «м'яких» дефектів. Таке середовище розглядалося як ланцюжок елементів з масою, пружних елементів і в'язкопружних елементів, з'єднаних, як наведено на рис. 1.5.

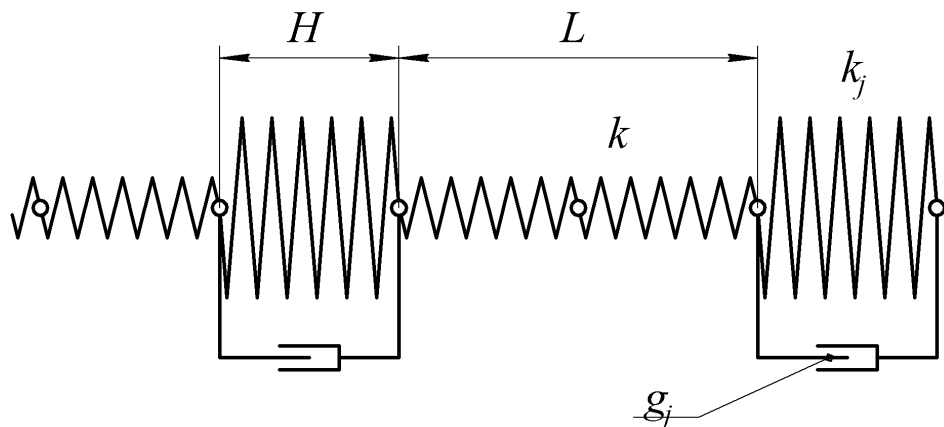


Рис. 1.5. Реологічно структурно-неоднорідне середовище з постійною добротністю

Було зроблено припущення, що пружним дефектам відповідають пружні елементи, які характеризуються коефіцієнтом пружності k . А дисипативним дефектам відповідають в'язкопружні елементи, запропоновані Кельвіном і Фойхтом, рівняння стану яких має вигляд

$$\sigma(X, \dot{X}) = k_j X + g_j \dot{X}, \quad (1.31)$$

де σ – механічне напруження; k_j – коефіцієнт пружності j -го елемента; g_j – коефіцієнт в'язкості j -го елемента; X – зміна довжини дисипативного дефекту.

Також було припущено, що в межах одиничної довжини ланцюжка міститься лише N елементів завдовжки H , при цьому кількість в'язкопружних елементів дорівнює N_l . Відповідно, концентрація ν дисипативних дефектів дорівнювала

$$\nu = \frac{N_l}{N}. \quad (1.32)$$

Таким чином, можливий ультразвуковий нелінійний контроль дефектів достатньо малої концентрації з високою роздільною здатністю, що дозволяє контролювати фізико-механічні властивості полікристалічних матеріалів, розглядаючи границю між зернами як геометричну особливість «м'яких» дефектів з великим розкидом пружних властивостей, який впливає на зміну добротності такого середовища.

Однак контроль середовища лише за геометричними особливостями «м'яких» дефектів, без урахування їхньої в'язкості і пружних властивостей, не дозволяє контролювати всі особливості таких дефектів, що є недоліком даного методу ультразвукового нелінійного контролю.

В роботі [7] розглядалися структурно-неоднорідні середовища, в яких могли поширюватися пружні хвилі мікрообертань (спінові пружні хвилі), швидкість розповсюдження яких залежала від напрямку мікроповоротів дефектів і відрізнялася від швидкості розповсюдження поздовжніх ультразвукових хвиль. Пройшовши достатньо велику відстань в такому середовищі, частина імпульсного впливу, зумовленого спіновими пружними хвилями, відокремлювалася від основного імпульсного впливу, зумовленого поздовжніми пружними ультразвуковими хвилями, і існувала окремо. При цьому в основному імпульсному впливі практично зникали ультразвукові нелінійні спотворення, що спостерігалися до цього.

Схема проведення експериментів з дослідження структурно-неоднорідних середовищ з ультразвуковими хвилями мікрообертань наведена на рис. 1.6. Для проведення експериментів використовували методику Кольського, яка полягала в імпульсному впливі на середовище, в ролі якого виступав розрізний стрижень Гопкінсона, і спостереження за відгуком цього середовища на імпульсний вплив.

Як характерний зразок використовували циліндричний стрижень діаметром 20 мм , який встановлювали між двома сталевими стрижнями. За допомогою газової гармати ударник у вигляді сталевого циліндра, довжиною від 50 до 150 мм , розганяли до швидкостей $(10...20)\text{ м/с}$ і ударили в торець одного зі

сталевих стрижнів, збуджуючи в ньому ультразвукову хвилю. Пара тензометричних приймачів, розташованих на сталевих стрижнях симетрично відносно циліндричного зразка, реєстрували ультразвукову хвилю, що падала на зразок, ультразвукову хвилю, що пройшла крізь зразок, і ультразвукову хвилю, відбиту від зразка.

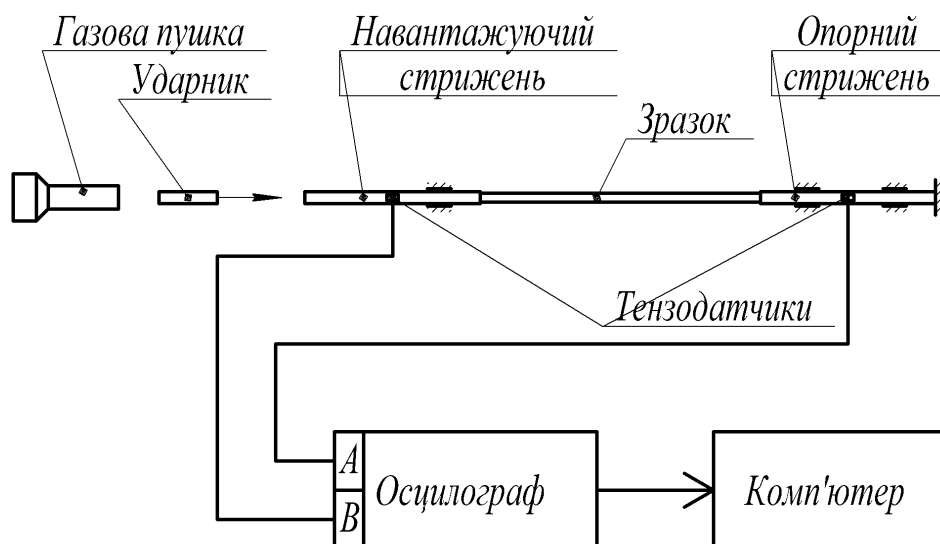


Рис. 1.6. Схема проведення експериментів з дослідження структурно-неоднорідних середовищ з пружними хвилями мікрообертань

Матеріалом циліндричних зразків слугував алюмінієвий сплав АМЦ (еталонне середовище без структурних неоднорідностей у вигляді гранул) і вольфрамово-епоксидний композит, виготовлений з епоксидної смоли і гранул вольфраму круглої форми, діаметром від $0,02$ до $0,2$ мм із середньою густиною 2000 кг/м^3 .

Отже, часове виділення спінових пружних хвиль, які несуть інформацію про дефекти середовища, дає можливість в декілька разів підвищити роздільну здатність, що дозволяє контролювати фізико-механічні властивості полікристалічних матеріалів, відокремлюючи в часі нелінійну ультразвукову взаємодію від лінійної ультразвукової взаємодії.

Проте, дефекти більшості полікристалічних матеріалів не створюють умов для розповсюдження хвиль мікрообертань, що суттєво знижує достовірність контролю і є недоліком даного методу ультразвукового нелінійного контролю.

Також в одній з робіт розглядалися структурно-неоднорідні середовища, основні дефекти яких являли собою гранули. В ній було показано, що границя між зернами – один з найважливіших фізико-механічних показників таких середовищ, який безпосередньо впливає як на їхні міцнісні, так і на їхні в'язкопружні характеристики.

В результаті проведених експериментів було показано, що для адекватного опису розповсюдження ультразвукових хвиль в таких середовищах необхідно розглядати три основні рівні структури цих середовищ, які перебувають в безперервній взаємодії між собою за рахунок внутрішніх зв'язків: мікрорівень (деформації окремих фрагментів структури), мезорівень (наявність структурних утворень: границь зерен, гранул, доменів, блоків тощо) і макрорівень («гомогенні» властивості середовища). Таке середовище розглядалося як одновимірний ланцюжок із прямокутних гранул розмірами $2l \times 2b$, як показано на рис. 1.7.

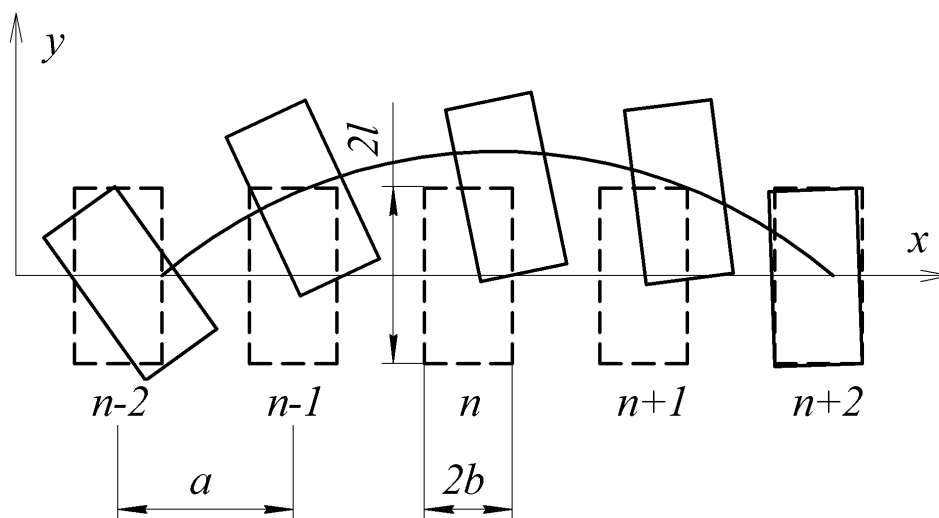


Рис. 1.7. Гранульоване структурно-неоднорідне середовище

Відстань між центрами мас прямокутних гранул в початковому стані дорівнювала a , при цьому виконувалася умова $a > 2b$. Кожна гранула мала три ступені свободи: зсув центра мас по двох осях x і y та поворот відносно центра мас. Крім того, було показано, що в гранульованому середовищі може генеруватися зсувна ультразвукова хвиля на другій гармоніці основної ультразвукової хвилі, яка залежить від фізико-механічних характеристик середовища

(лінійних модулів пружності, пористості тощо).

Отже, наявність дефектів на трьох основних рівнях структури призводить до генерації гармонік основної ультразвукової хвилі, що дає змогу контролювати фізико-механічні властивості полікристалічних матеріалів за рівнем другої гармоніки ультразвукової хвилі, розглядаючи зерна в них як гранули різних розмірів.

Проте, оскільки зсувна ультразвукова хвиля на другій гармоніці розповсюджується в середовищах із трансляційними і ротаційними ступенями свободи, характерними не для всіх видів полікристалічних матеріалів, це є недоліком цього методу ультразвукового нелінійного контролю.

В роботі [4] розглядалися структурно-неоднорідні середовища з самодією, дефекти в яких являли собою гранули. Було показано, що в середовищі може спостерігатися ефект самозбудження (зменшення загасання ультразвукової хвилі при збільшенні її амплітуди) в усьому діапазоні інтенсивностей. Запропоновано описувати такі середовища за допомогою рівняння стану

$$\sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) = \sigma_1(\varepsilon) + \sigma_2(\dot{\varepsilon}), \quad (1.33)$$

де σ – поздовжнє механічне напруження; σ_1 – пружна (реактивна) частина рівняння стану; σ_2 – непружна (дисипативна) частина рівняння стану; ε – поздовжня відносна деформація; $\dot{\varepsilon}$ – швидкість зміни поздовжньої відносної деформації.

Пружна частина σ_1 рівняння стану (1.33) мала вигляд

$$\sigma_1(\varepsilon) = E\varepsilon, \quad (1.34)$$

де E – лінійний модуль пружності (модуль Юнга).

А непружна частина σ_2 рівняння стану (1.33) мала вигляд

$$\sigma_2(\dot{\varepsilon}) = \rho \left(\alpha + g |\dot{\varepsilon}|^m \right) \dot{\varepsilon}, \quad (1.35)$$

де ρ – густина структурно-неоднорідного середовища; α , g , m – нелінійні параметри.

Схема проведення експериментів з дослідження структурно-неоднорідних середовищ із самозбудженням наведена на рис. 1.8.

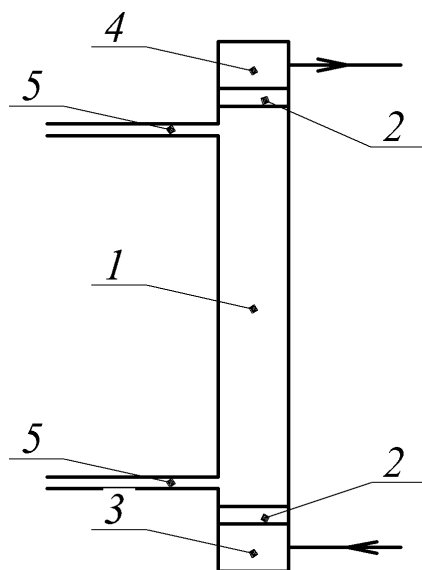


Рис. 1.8. Схема проведення експериментів з дослідження структурно-неоднорідних середовищ із самозбудженням

Як характерний зразок використовували два види піску: сухий пісок і водонасичений пісок. В експерименті використовували скляну трубку 1 з внутрішнім діаметром 9 мм , зовнішнім діаметром 11 мм і довжиною $L = 37\text{ см}$, верхні кінці якої закривалися металевими пробками 2. Трубка 1 заповнювалася піском із середнім розміром піщинок $0,02\text{ см}$, водонасиченість якого змінювали через трубку 5.

П'єзоелектричним випромінювачем 3 випромінювали високочастотні імпульси з несучою частотою $f = 100\text{ кГц}$, тривалістю $\tau = 300\text{ мкс}$ і частотою повторення $F = 30\text{ Гц}$. Імпульси, що пройшли через трубку 1, приймалися п'єзоелектричним приймачем 4. Також було показано, що ступінь водонасичення піску впливає на параметри дисипативної нелінійності такого середовища.

Таким чином, зміна концентрації вологи в піску змінює значення нелінійних параметрів α , g і m , що дає можливість контролювати фізико-механічні властивості полікристалічних матеріалів, розглядаючи зерна в них як гранули певного розміру. Проте ефект самозбудження може спостерігатися лише за пе-

вних значень нелінійних параметрів α , g і m , характерних для конкретних умов експлуатації, що є недоліком цього методу ультразвукового нелінійного контролю.

В роботі [3] розглядалися структурно-неоднорідні середовища, дефектами в яких були пори. В ній було показано, що при збільшенні в таких середовищах амплітуди ε_0 потужної ультразвукової хвилі накачки відбувається зсув частоти резонансу, а також збільшення ширини резонансної кривої для слабкої ультразвукової хвилі.

Як характерний зразок використовувався стрижневий резонатор 1 з пісковику, як показано на рис. 1.9. Довжина стрижневого резонатора 1 становила $L = 28$ см, а діаметр – $d = 2,5$ см. Було висловлено припущення, що зазначені ефекти пов'язані зі зменшенням лінійного модуля пружності (зменшенням швидкості слабкої ультразвукової хвилі) і зі зменшенням добротності (збільшенням нелінійних втрат) стрижневого резонатора 1.

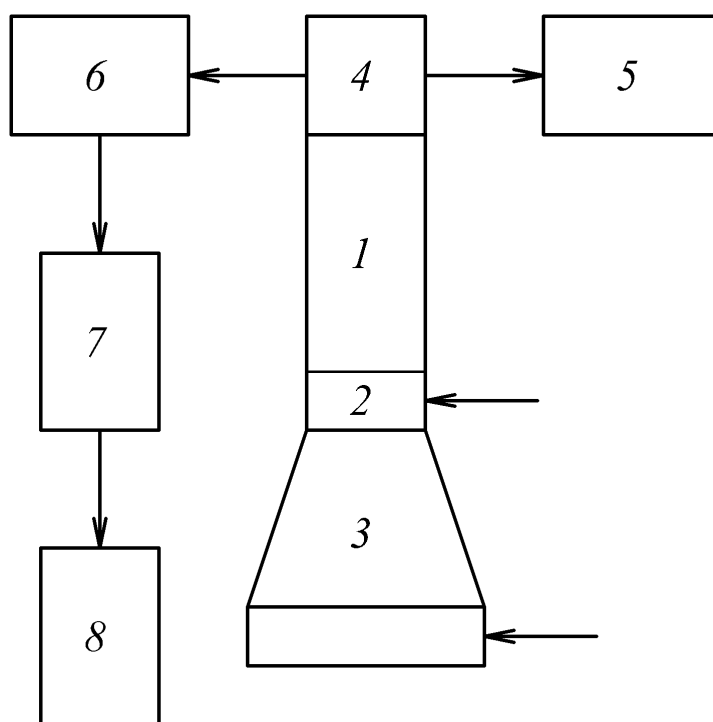


Рис. 1.9. Схема проведення експериментів з дослідження пористих структурно-неоднорідних середовищ

П'єзокерамічний випромінювач 2 слабкої ультразвукової хвилі було приклеєно до торця стрижневого резонатора 1 і до титанового концентратора 3 ма-

сою $M = 2 \text{ кг}$, який був випромінювачем потужної ультразвукової хвилі накачки.

Граничні умови на цьому торці титанового концентратора 3 були близькі до умови абсолютно «жорсткої» ультразвукової границі. До іншого торця стрижневого резонатора 1 приклеювався п'єзоелектричний приймач 4 невеликої маси. Граничні умови на цьому торці були близькі до умов на ультразвуковій «м'якій» границі.

З п'єзоелектричного приймача 4 сигнал надходив на спектроаналізатор 5 для вимірювання амплітуди потужної ультразвукової хвилі накачки, а також через режекторний фільтр 6, який пригнічував сигнал ультразвукової хвилі накачки на 30 дБ , на селективний вольтметр 7 і осцилограф 8, де проводилося вимірювання амплітуди слабкої ультразвукової хвилі.

Також було запропоновано описувати такі середовища за допомогою гістerezисного рівняння стану

$$\sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) = E(\varepsilon - f(\varepsilon, \dot{\varepsilon})) + \alpha \rho \dot{\varepsilon}, \quad (1.36)$$

де σ – поздовжнє механічне напруження; ε – поздовжня відносна деформація; E – лінійний модуль пружності (модуль Юнга); ρ – густина; α – коефіцієнт лінійного загасання; $f(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$ – нелінійна кусково-неперервна функція відносної деформації ε і швидкості $\dot{\varepsilon}$ відносної деформації.

Функція $f(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$ була подана як кусково-безперервна:

$$f(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) = \begin{cases} 0,5\gamma_1\varepsilon^2, & \varepsilon > 0, \dot{\varepsilon} > 0, \\ -0,5\gamma_2\varepsilon^2 + 0,5(\gamma_1 + \gamma_2)\varepsilon_0\varepsilon, & \varepsilon > 0, \dot{\varepsilon} < 0, \\ -0,5\gamma_3\varepsilon^2, & \varepsilon < 0, \dot{\varepsilon} < 0, \\ 0,5\gamma_4\varepsilon^2 + 0,5(\gamma_3 + \gamma_4)\varepsilon_0\varepsilon, & \varepsilon < 0, \dot{\varepsilon} > 0, \end{cases} \quad (1.37)$$

де ε_0 – амплітуда відносної деформації; $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$ – нелінійні параметри.

Нелінійні параметри $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$ могли відрізнятися один від одного в декілька разів. Для пояснення ефекту зменшення добротності (збільшення нелінійних втрат) стрижневого резонатора 1 для слабкої ультразвукової хвилі за на-

явності потужної ультразвукової хвилі накачування було запропоновано ввести в гістерезисне рівняння стану (1.37) дисипативну нелінійність $g|\varepsilon|^m$:

$$\sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) = E(\varepsilon - f(\varepsilon, \dot{\varepsilon})) + \alpha \rho (1 + g|\varepsilon|^m) \dot{\varepsilon}, \quad (1.38)$$

де g, m – нелінійні параметри.

В роботі [9] також розглядалися структурно-неоднорідні середовища, дефекти в яких представлені порами. Схема експериментальної установки була спрямована на дослідження ультразвукових нелінійних ефектів амплітудно-залежного внутрішнього тертя на перших п'яти поздовжніх модах стрижневого резонатора з пісковиком, який характеризується розміром зерна $(0,2 \dots 0,3)$ мм. В ній було показано, що більшість пористих структурно-неоднорідних середовищ мають як гістерезисну, так і дисипативну ультразвукові нелінійності, причому зі збільшенням частоти прояв гістерезисної нелінійності звичайно зменшується, а прояв дисипативної нелінійності звичайно збільшується.

Також було зроблено припущення, що різні частотні залежності для гістерезисної і дисипативної нелінійностей пов'язані з тим, що дефекти характеризуються різними частотами релаксації (що є характеристикою гістерезисної нелінійності) і частотами резонансу (що є характеристикою дисипативної нелінійності). Крім того, було отримано функцію $N(\zeta, \omega)$ розподілу дефектів гістерезисного типу за відносними пружностями ζ і за частотами релаксації ω . Зроблено висновок, що роль дефектів в полікристалічних матеріалах можуть відігравати скупчення дислокацій або мікротріщини, а також границі між зернами.

Отже, збільшення амплітуди потужної пружної ультразвукової хвилі накачування призводить до зменшення лінійного модуля пружності і зменшення добротності, що дозволяє контролювати фізико-механічні властивості полікристалічних матеріалів, розглядаючи зерна в них як «жорстку» основу, а границі між зернами – як «м'які» дефекти у вигляді пор. Проте, збільшення амплітуди потужної ультразвукової хвилі накачування часто потребує додаткової підготовки середовища, зокрема розташування потужного випромінювача, вирівню-

вання місця введення ультразвукової хвилі в контрольоване середовище, створення елементів армування і кріплення тощо, що є недоліком цього методу ультразвукового нелінійного контролю.

В роботі [4] розглядалися гістерезисні структурно-неоднорідні середовища, що характеризуються «недосконалою» пружністю. В роботі було показано, що наявність в такому середовищі різних дефектів призводить до різноманітних ультразвукових нелінійних ефектів: різномодульності (відмінності модулів пружності при стисканні і розтягуванні), зміни ступеня нелінійності рівняння стану з цілого числа на дробове число і навпаки, появи гістерезисної (неоднозначної) залежності $\sigma = \sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$ (що є дуже характерним для полікристалічних матеріалів). Також було наведено два основних феноменологічних гістерезисних рівняння стану для структурно-неоднорідних середовищ з недосконалою пружністю.

В рамках цих двох рівнянь було проведено дослідження ультразвукових нелінійних ефектів, які виникають під час розповсюдження поздовжніх ультразвукових хвиль в таких середовищах, визначено профілі ультразвукових хвиль, їхні нелінійні параметри і спектри. Показано, що залежності $\sigma = \sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$ для таких середовищ звичайно є неаналітичними (тобто негладкими і недиференційовними).

Крім цього, було показано, що для рівнянь стану $\sigma = \sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$ гістерезисних структурно-неоднорідних середовищ характерні такі положення: кожна гілка гістерезису є квадратичною функцією відносної деформації ε ; перехід з однієї гілки гістерезису на іншу відбувається при зміні знака ε і/або знака $\dot{\varepsilon}$, при цьому залежність $\sigma = \sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$ є неперервною; для достатньо малих відносних деформацій ε гістерезисна нелінійність відсутня або нехтовно мала; відношення нелінійного декременту загасання до дефекту модуля пружності за достатньо малих відносних деформацій ε є практично постійною величиною.

Було визначено, що ультразвукові нелінійні параметри таких середовищ на 3...4 порядки перевищують за значенням їхні ультразвукові лінійні параме-

три. Внаслідок цього, ультразвукові нелінійні параметри таких середовищ в багато разів чутливіші до наявності в них різноманітних дефектів, ніж їхні лінійні ультразвукові параметри.

В роботі [4] показано, що в загальному випадку рівняння стану гістерезисного структурно-неоднорідного середовища описується рівнянням

$$\sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) = E(\varepsilon - f(\varepsilon, \dot{\varepsilon})), \quad (1.39)$$

де E – лінійний модуль пружності (модуль Юнга); $f(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$ – нелінійна кусково-неперервна функція відносної деформації ε і швидкості $\dot{\varepsilon}$ відносної деформації.

Для гістерезису тертя нелінійна функція $f(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$ мала такий вигляд:

$$f(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) = \alpha \varepsilon_m \varepsilon + \begin{cases} 0,5 \beta_1 \varepsilon^2 - 0,25(\beta_1 + \beta_2) \varepsilon_m^2, & \dot{\varepsilon} > 0, \\ -0,5 \beta_2 \varepsilon^2 + 0,25(\beta_1 + \beta_2) \varepsilon_m^2, & \dot{\varepsilon} < 0, \end{cases} \quad (1.40)$$

де ε_m – амплітуда відносної деформації; α , β_1 , β_2 – нелінійні параметри.

Для гістерезису відриву нелінійна функція $f(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$ мала дещо інший вигляд.

$$f(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) = \begin{cases} 0,5 \gamma_1 \varepsilon^2, & \varepsilon > 0, \dot{\varepsilon} > 0, \\ -0,5 \gamma_2 \varepsilon^2 + 0,5(\gamma_1 + \gamma_2) \varepsilon_m^+ \varepsilon, & \varepsilon > 0, \dot{\varepsilon} < 0, \\ -0,5 \gamma_3 \varepsilon^2, & \varepsilon < 0, \dot{\varepsilon} < 0, \\ 0,5 \gamma_4 \varepsilon^2 + 0,5(\gamma_3 + \gamma_4) \varepsilon_m^- \varepsilon, & \varepsilon < 0, \dot{\varepsilon} > 0, \end{cases} \quad (1.41)$$

де ε_m^+ – амплітуда відносної деформації при стисканні; ε_m^- – амплітуда відносної деформації при розтягуванні; γ_1 , γ_2 , γ_3 , γ_4 – нелінійні параметри.

Таким чином, гістерезисні моделі структурно-неоднорідних середовищ, які застосовують два різних рівняння стану, можна використовувати для контролю фізико-механічних властивостей полікристалічних матеріалів, оскільки для таких матеріалів характерна неоднозначність ультразвукових властивостей при зміні як напряму відносної деформації ε , так і швидкості $\dot{\varepsilon}$ відносної деформації.

1.3. Переваги і недоліки сучасних методів ультразвукового контролю структурно-неоднорідних середовищ

Розглянуті вище методи ультразвукового нелінійного контролю полікристалічних структурно-неоднорідних матеріалів, які використовують різні ультразвукові нелінійні ефекти, мають як переваги, так і недоліки. Проведений порівняльний аналіз розглянутих методів ультразвукового контролю дозволив встановити наступне.

По-перше, в більшості експериментальних установок використовуються електронні компоненти, такі як звукові генератори, підсилювачі потужності, фільтри верхніх і нижніх частот, свіп-генератори, селективні підсилювачі і деякі інші, які самі по собі мають досить великий рівень нелінійних спотворень, на фоні яких виявити ультразвукову нелінійність середовища досить складно.

По-друге, найчастіше під час проведення експериментів виконують безпосереднє вимірювання параметрів ультразвукової хвилі, таких як її амплітуда або фазова швидкість. За умови невеликого рівня ультразвукової нелінійності середовища виміряти зміну зазначених вище параметрів з необхідною точністю досить складно.

По-третє, часто під час опису розповсюдження ультразвукової хвилі в контрольованому середовищі не враховується стан поточної деформації середовища (середовище в даний момент стиснуте або розтягнуте), а також швидкість розповсюдження деформації (що в даний момент відбувається – стискання або розтягування середовища). Отже, за достатньо високої концентрації дефектів в середовищі, розповсюдження в ньому ультразвукової хвилі описується недостатньо адекватно.

По-четверте, при контролі ультразвукової нелінійності середовища не враховується вплив багатьох додаткових факторів, основними з яких є температура T середовища, амплітуда ε_m відносної деформації середовища, частота f пружної хвилі і деякі інші.

По-п'яте, часто контроль середовища передбачає визначення «узагальне-

ного» типу дефекту, що не дозволяє визначити його конкретний тип.

По-шосте, під час контролю ультразвукової нелінійності середовища більшість розглянутих методів дає змогу отримати лише якісну, а не кількісну характеристику середовища, часто використовуючи оцінку «є дефект – немає дефекту» і, таким чином, не дозволяючи кількісно оцінити розмір дефекту.

Розглянуті вище методи ультразвукового нелінійного контролю структурно-неоднорідних середовищ, які з'явилися останнім часом, з одного боку, відрізняються великою різноманітністю дослідницьких підходів і нестандартних технічних рішень. З іншого боку, структурно-неоднорідні середовища є збіркою назвою різних класів матеріалів, що мають як спільні фізико-механічні властивості, так і можуть суттєво відрізнятися як між класами, так і між собою в межах одного класу. Тому постає питання, які з методів ультразвукового нелінійного контролю структурно-неоднорідних середовищ найбільшою мірою придатні для контролю фізико-механічних властивостей полікристалічних матеріалів, зокрема їхньої міцності. Оскільки основними дефектами кристалічної решітки полікристалічних матеріалів є дислокації, то їхня наявність призводить до гістерезисної (неоднозначної) залежності між σ і ε . Тому засоби ультразвукового нелінійного контролю повинні містити елементи, що враховують як зміну знака ε , так і зміну знака $\dot{\varepsilon}$. Оскільки полікристалічні матеріали мають пружну нелінійність, яка здебільшого є ступеневою (частіше квадратичною) функцією, то засоби ультразвукового нелінійного контролю повинні враховувати поліноміальні залежності між σ (з одного боку), а також ε і $\dot{\varepsilon}$ (з іншого боку). Засоби ультразвукового нелінійного контролю повинні мати можливість зондування полікристалічних матеріалів як в імпульсному, так і в безперервному (або псевдо-безперервному) режимах.

Враховуючи наведені вище вимоги до засобів ультразвукового контролю, а також переваги і недоліки існуючих методів ультразвукового контролю, в основу пропонованих засобів ультразвукового нелінійного контролю може бути покладено феноменологічне рівняння стану гістерезисного структурно-неоднорідного середовища (1.39), нелінійна функція $f(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$ якого для гістерезисного

зису тертя (непружного гістерезису) має вигляд (1.40), а для гістерезису відриву (пружного гістерезису) має вигляд (1.41). Основною метою контролю структурно-неоднорідних конструкційних полікристалічних матеріалів є не визначення їхніх ультразвукових нелінійних властивостей, а визначення на основі ультразвукових нелінійних властивостей їхніх фізико-механічних характеристик.

До таких фізико-механічних характеристик належить, насамперед, межа міцності на розрив σ_B , фізична межа текучості σ_T , умовна межа текучості з допуском на величину пластичної деформації при навантаженні $0,02\% \sigma_{0,02}$, фізична межа пружності $\sigma_{пр}$, межа міцності на зріз $\sigma_{зр}$ і деякі інші. Для полікристалічних конструкційних матеріалів найважливішою фізико-механічною характеристикою є міцність, яку можна оцінити, знаючи межу міцності на розрив σ_B . З полікристалічних конструкційних матеріалів інтерес становлять вироби, виготовлені з кольорових металів, зокрема, з латуней. Такий інтерес пояснюється широким застосуванням латуней, які мають високі антифрикційні і корозійностійкі властивості, стійкість до впливу води, добрі ливарні властивості тощо. Як відомо, латуні – це подвійні або багатокomпонентні сплави, в яких основним легуючим компонентом є цинк. Вміст цинку не повинен бути меншим 4% і більшим 50% за масою. Спектр застосування латуней надзвичайно широкий. З них виготовляють штамповані деталі, труби теплообмінників, високонавантажenu арматуру, вкладиші для підшипників, зубчасті колеса тощо. При цьому основною вимогою до конструкційних матеріалів (зокрема, і до латуней) є збереження їх експлуатаційних характеристик протягом усього періоду експлуатації.

В результаті розгляду існуючих методів ультразвукового нелінійного контролю можна дійти висновку, що міцність полікристалічних матеріалів (зокрема, латуней) значною мірою залежить від властивостей границь між зернами. Наприклад, у латуней після тривалих механічних або теплових навантажень, внаслідок зміни структури зерна може суттєво, на одиниці або десятки відсотків, зменшитися межа міцності на розрив σ_B .

Таким чином:

1. Окрім фізичної і геометричної ультразвукових нелінійностей, середовища з порушеннями суцільності характеризуються структурною ультразвуковою нелінійністю. Така нелінійність впливає на параметри пружної хвилі значно більше (на декілька порядків), ніж фізична і геометрична нелінійності, при цьому інтенсивність ультразвукової хвилі може бути досить малою, не перевищуючи $(0,5 \dots 1,0) \text{ Вт/см}^2$.

2. Основний внесок в ультразвукову нелінійність структурно-неоднорідних середовищ роблять «м'які» дефекти: дислокації, границі між зернами, тріщини, пори, гранули тощо. Значення такої нелінійності визначається відношенням модулів пружності «жорсткої» основи і «м'яких» дефектів, причому нелінійність починає проявлятися за досить низької об'ємної концентрації таких дефектів $\sim (10^{-6} \dots 10^{-5})$.

3. Різде збільшення структурної ультразвукової нелінійності настає при перевищенні певного порогу збудження за амплітудою ультразвукової хвилі, яка для різних полікристалічних матеріалів має різне значення. Рівень нелінійних спотворень ультразвукової хвилі часто дуже незначний і становить звичайно не більше ніж кілька десятків відсотків від амплітуди самої ультразвукової хвилі.

4. Більшість полікристалічних матеріалів виявляють як пружну, так і дисипативну ультразвукові нелінійності, що зумовлює залежність умов проходження ультразвукової хвилі через такий матеріал як від її інтенсивності, так і від її частоти. Зв'язок між механічним напруженням σ і відносною деформацією ε для таких матеріалів в загальному випадку має вигляд $\sigma(\varepsilon) = E(\varepsilon + \gamma\varepsilon^2 + \beta\varepsilon^3 + \dots)$, де E – лінійний модуль пружності, а γ , β – нелінійні параметри.

5. Найбільш адекватно описати умови проходження ультразвукової хвилі через структурно-неоднорідні полікристалічні матеріали можна за допомогою гістерезисних рівнянь стану. Використовуючи гістерезисні рівняння стану, мо-

жна пояснити такі ультразвукові нелінійні явища, як амплітудно-залежне внутрішнє тертя, дефект модуля пружності, зміна декременту загасання і деякі інші. Існують два основних види гістерезису: гістерезис тертя (непружний гістерезис) і гістерезис відриву (пружний гістерезис).

6. Дослідження умов проходження пружної хвилі через структурно-неоднорідні полікристалічні матеріали за допомогою гістерезисних рівнянь стану можливе на частотах, на один-два порядки нижчих за частоти релаксації «м'яких» дефектів. Це пов'язано з тим, що в більш високочастотному діапазоні «м'які» дефекти сильно «задемпфовані» і практично не деформуються, що суттєво зменшує їхній вплив на параметри ультразвукової хвилі та гістерезис тертя і гістерезис відриву.

7. Однією з основних фізико-механічних властивостей структурно-неоднорідних полікристалічних матеріалів є межа міцності на розрив σ_B , оскільки саме вона здебільшого визначає міцність таких матеріалів.

8. Одним із найважливіших завдань ультразвукового нелінійного контролю є встановлення діапазонів зміни параметрів ультразвукових хвиль, таких як зміна $\Delta c/c$ фазової швидкості c ультразвукової хвилі і зміна $\Delta K/K$ нелінійного коефіцієнта поглинання K ультразвукової хвилі, що відповідають діапазонам зміни фізико-механічних характеристик полікристалічних матеріалів – зокрема, такій важливій характеристиці, як межа міцності на розрив σ_B . Це, своєю чергою, дозволить проектувати автоматизовані системи неруйнівного ультразвукового нелінійного контролю міцності полікристалічних матеріалів і встановлювати їх оптимальні режими роботи.

2. УЛЬТРАЗВУКОВІ ХВИЛІ В ПОЛІКРИСТАЛІЧНИХ МАТЕРІАЛАХ

2.1. Визначення аналітичної залежності між міцністю полікристалічних матеріалів і параметрами ультразвукових хвиль

Міцність структурно-неоднорідних полікристалічних матеріалів визначається найслабшим з елементів таких матеріалів, а саме границями їх зерен. Структура границь зерен є дуже складною, тому границі зерен є важливою складовою дефектної структури полікристалічних матеріалів [11]. Наразі жодна з відомих теорій звичайних міжзернових границь не дає змогу надійно оцінювати основні термодинамічні параметри міжзернових границь і розраховувати їхні кінетичні властивості, оскільки теорія звичайних границь перебуває на стадії формування. Особливо важливу роль границі зерен відіграють в процесах деформації і руйнування за підвищених механічних напружень і температур. За цих умов макроскопічні властивості полікристалічних матеріалів залежать не лише від загальної протяжності границь зерен (від величини і кількості зерен), але і від мікроскопічних властивостей границь, а також від їхнього структурного стану.

Властивості границь між зернами суттєво впливають на формування структури таких матеріалів, визначаючи характер процесів повернення, рекристалізації, сегрегації домішок, коалесценції дисперсних частинок і деяких інших. Відомо, що існують взаємні зв'язки між міцністю конструкційних полікристалічних матеріалів, параметрами границь між зернами в цих матеріалах і параметрами ультразвукових хвиль, які проходять через ці матеріали [42]. Основними ультразвуковими нелінійними ефектами при проходженні ультразвукових хвиль є: зміна $\Delta c/c$ фазової швидкості c ультразвукової хвилі на першій гармоніці і зміна $\Delta K/K$ коефіцієнта поглинання K ультразвукової хвилі на першій гармоніці. Більшість експериментальних досліджень показує, що ці зміни є незначними і не перевищують $(1...2)\%$ [11, 12].

В результаті аналізу існуючих методів ультразвукового нелінійного контролю фізико-механічних характеристик структурно-неоднорідних полікриста-

лічних матеріалів було висунуто дві гіпотези.

Перша гіпотеза полягає в тому, що зміна фізико-механічних характеристик структурно-неоднорідних полікристалічних матеріалів, зокрема межі міцності на розрив σ_B , впливає як на зміну $\Delta c/c$ фазової швидкості c ультразвукової хвилі, так і на зміну $\Delta K/K$ коефіцієнта поглинання K ультразвукової хвилі. Було висловлено припущення, що межа міцності на розрив σ_B структурно-неоднорідних полікристалічних конструкційних матеріалів пов'язана як зі зміною $\Delta c/c$ фазової швидкості c ультразвукової хвилі, так і зі зміною $\Delta K/K$ коефіцієнта поглинання K ультразвукової хвилі залежностями, близькими до лінійних.

Друга гіпотеза полягає в тому, що на зміну $\Delta c/c$ фазової швидкості c ультразвукової хвилі і на зміну $\Delta K/K$ коефіцієнта поглинання K ультразвукової хвилі впливає декілька додаткових факторів, внесок кожного з яких є також значущим. До таких факторів належать: амплітуда ультразвукової хвилі, температура досліджуваного полікристалічного матеріалу, частота ультразвукової хвилі тощо.

Наприклад, зі збільшенням амплітуди ультразвукової хвилі починає проявлятися амплітудно-залежне внутрішнє тертя в полікристалічному матеріалі і починають збільшуватися втрати ультразвукової енергії, що призводить до зміни параметрів ультразвукової хвилі, яка проходить крізь цей матеріал.

При цьому для опису розповсюдження ультразвукової хвилі в полікристалічних матеріалах найбільш придатним є феноменологічне рівняння стану (1.39), нелінійна функція $f(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$ якого для гістерезису тертя має вигляд (1.40), а для гістерезису відриву має вигляд (1.41).

Також відомо, що ультразвукові нелінійні характеристики полікристалічних матеріалів залежать від амплітуди ультразвукової хвилі і, відповідно, впливають на параметри ультразвукової хвилі, зокрема $\Delta K/K$ і $\Delta c/c$ [42]. Для перевірки першої і другої гіпотез необхідно виконати математичне моделювання розповсюдження ультразвукової хвилі за допомогою феноменологічного рів-

няння стану (1.39), а також провести експериментальні дослідження, які підтверджують висунуті гіпотези.

Завдання забезпечення постійного значення амплітуди ультразвукової хвилі під час виконання математичного моделювання є простою задачею. Проте, під час виконання експериментальних досліджень підтримувати амплітуду ультразвукової хвилі на одному рівні в усьому діапазоні інтенсивностей і частот є складним завданням, оскільки на амплітуду впливає багато додаткових факторів: нестабільність напруги живлення електричних компонентів; нестабільність параметрів електроультразвукових перетворювачів, які застосовуються для випромінювання/приймання (наприклад, при використанні п'єзоелектричної кераміки для пружних констант допуск становить $\pm 5\%$, п'єзоелектричних – $\pm 10\%$, діелектричних – $\pm 20\%$ згідно з [14]); нерівномірність амплітудно-частотних характеристик електричних компонентів; старіння електричних компонентів тощо.

Тому пропонується як під час моделювання, так і при виконанні експериментальних досліджень зондувати полікристалічні матеріали пакетами ультразвукових коливань із жорстко заданим співвідношенням амплітуд, оскільки підтримувати саме співвідношення між амплітудами пакетів ультразвукових коливань технічно значно простіше, ніж підтримувати амплітуди кожного з пакетів окремо [43–54]. При цьому проходження пакета з меншою амплітудою відбуватиметься за відсутності ультразвукових нелінійних ефектів, а проходження пакета з більшою амплітудою, навпаки, відбуватиметься з урахуванням ультразвукових нелінійних ефектів. В результаті подальшої алгоритмічної обробки прийнятих пакетів ультразвукових коливань з них виділяється інформація про зміну $\Delta c/c$ фазової швидкості c і зміни $\Delta K/K$ коефіцієнта поглинання K .

Співвідношення амплітуд ультразвукових коливань в кожному з пакетів знаходиться у діапазоні від $10:1$ до $100:1$, оскільки при зменшенні співвідношення менше $10:1$ досить складно виділити лінійну і нелінійну складові в пружній хвилі, а при збільшенні цього співвідношення більше $100:1$ зростає похибка при формуванні пакетів коливань. Кожен пакет пружних коливань міс-

тять від 20 до 100 повних коливань, що визначається необхідним спектральним складом ультразвукової хвилі і геометричними розмірами зразків, виготовлених з полікристалічних матеріалів.

2.2. Застосування рівняння стану з нелінійними функціями гістерезису тертя і гістерезису відриву

Для перевірки першої і другої висунутих гіпотез необхідно виконати математичне моделювання розповсюдження ультразвукової хвилі за допомогою феноменологічного рівняння стану (1.39) з нелінійними функціями гістерезису тертя (1.40) і гістерезису відриву (1.41). Рівняння стану для гістерезису тертя складається з лінійної $E\varepsilon$ і нелінійної $Ef(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$ частин:

$$\sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) = E\varepsilon - Ef(\varepsilon, \dot{\varepsilon}), \quad (2.1)$$

де $f(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$ – нелінійна кусково-неперервна функція від ε і $\dot{\varepsilon}$.

Для гістерезису тертя вона має наступний вигляд (рис. 2.1):

$$f(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) = \alpha \varepsilon_m \varepsilon + \begin{cases} 0,5\beta_1 \varepsilon^2 - 0,25(\beta_1 + \beta_2) \varepsilon_m^2, & \dot{\varepsilon} > 0, \\ -0,5\beta_2 \varepsilon^2 + 0,25(\beta_1 + \beta_2) \varepsilon_m^2, & \dot{\varepsilon} < 0, \end{cases} \quad (2.2)$$

де ε_m – амплітуда відносної деформації; α , β_1 , β_2 – нелінійні параметри, причому $|\alpha| \varepsilon_m \ll 1$, $|\beta_{1,2}| \varepsilon_m \ll 1$, $1 \ll |\beta_{1,2}|$.

За позитивного напрямку відносної деформації ε (полікристалічний матеріал розтягується) механічне напруження $\sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$ визначається за нижньою гілкою графіка, а за негативного напрямку відносної деформації ε (полікристалічний матеріал стискається) – за верхньою гілкою графіка (рис. 2.1).

Площа між нижньою і верхньою гілками графіка (рис. 2.1) визначає ультразвукові нелінійні втрати енергії ультразвукової хвилі. Зв'язок нелінійних параметрів α , β_1 , β_2 з параметрами ультразвукової хвилі встановлюється наступним чином. Вимірюється амплітуда ε_2 другої гармоніки $\varepsilon(x, \theta)$, декремент загасання δ і зміна швидкості $\Delta c/c$ пружної хвилі, що входять до системи рівнянь (2.3), (2.4) і (2.5).

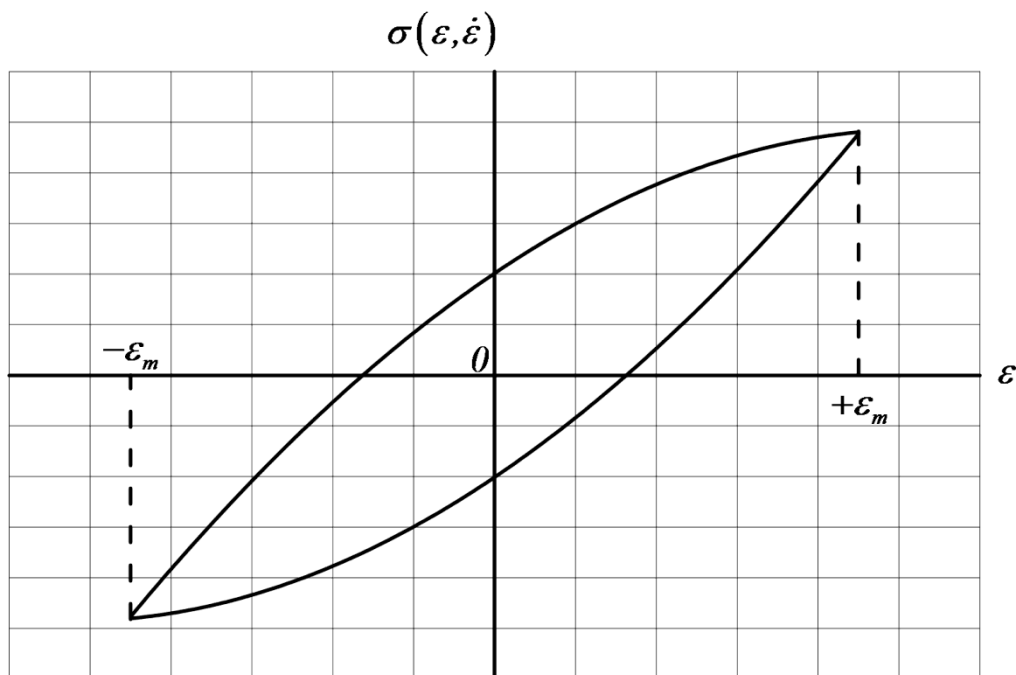


Рис. 2.1. Навантажувальна залежність рівняння стану для гістерезису тертя $\sigma(\epsilon, \dot{\epsilon})$

$$\begin{aligned} \epsilon(x, \theta) = & \left(1 - \frac{\beta_1 + \beta_2}{3\pi} \epsilon_m kx \right) \times \\ & \times \left(\epsilon_m \sin \left(\theta - \frac{\alpha \epsilon_m kx}{2} \right) - \frac{\beta_1 - \beta_2}{8} \epsilon_m^2 kx \sin \left(2 \left(\theta - \frac{\alpha \epsilon_m kx}{2} \right) \right) + \frac{\beta_1 + \beta_2}{3\pi} \epsilon_m^2 kx \times \right. \\ & \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n-1)(2n-3)} \sin(2n+1) \left(\theta - \frac{\alpha \epsilon_m kx}{2} \right) \Bigg), \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$\delta = \frac{2}{3} (\beta_1 + \beta_2) \epsilon_m, \quad (2.4)$$

$$\frac{\Delta c}{c} = \frac{\alpha}{2} \epsilon_m. \quad (2.5)$$

Коефіцієнти a_n і b_n розкладу $\epsilon(x, \theta)$ в ряд наведено в [5–8]. Отримана система рівнянь (2.3), (2.4) і (2.5) розв’язується чисельним методом, внаслідок чого знаходять α , β_1 , β_2 . Експериментальні дослідження полікристалічних матеріалів (сплавів міді і цинку) показують, що значення нелінійного параметра α переважно знаходяться в діапазоні $200 \dots 2000$, а нелінійних параметрів β_1 , β_2 – в діапазоні $100 \dots 3000$. Рівняння стану для гістерезису тертя (2.1) адекватно описує розповсюдження ультразвукової хвилі лише на «малих» відстанях від

випромінювача в «близькому» полі, де «малість» відстані x визначається як

$$x \ll \frac{4}{(\beta_1 + \beta_2) \varepsilon_m k}, \quad (2.6)$$

де k – хвильове число.

При цьому рівняння стану для гістерезису відриву складається з лінійної $E\varepsilon$ і нелінійної $Ef(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$ частин, аналогічно рівнянню (2.1). Однак нелінійна кусково-безперервна функція $f(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$ від ε і $\dot{\varepsilon}$ для гістерезису відриву має де-що інший вигляд (див. рис. 2.2):

$$f(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) = \begin{cases} 0,5\gamma_1\varepsilon^2, & \varepsilon > 0, \dot{\varepsilon} > 0, \\ -0,5\gamma_2\varepsilon^2 + 0,5(\gamma_1 + \gamma_2)\varepsilon_m^+\varepsilon, & \varepsilon > 0, \dot{\varepsilon} < 0, \\ -0,5\gamma_3\varepsilon^2, & \varepsilon < 0, \dot{\varepsilon} < 0, \\ 0,5\gamma_4\varepsilon^2 + 0,5(\gamma_3 + \gamma_4)\varepsilon_m^-\varepsilon, & \varepsilon < 0, \dot{\varepsilon} > 0, \end{cases} \quad (2.7)$$

де ε_m^+ – додатна амплітуда відносної деформації; ε_m^- – від’ємна амплітуда відносної деформації; $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$ – нелінійні параметри, причому $|\gamma_{1,2}\varepsilon_m^+| \ll 1$, $|\gamma_{2,4}\varepsilon_m^-| \ll 1$, $1 \ll |\gamma_{1,2,3,4}|$.

В залежності від напрямку відносної деформації ε і напрямку швидкості відносної деформації $\dot{\varepsilon}$ полікристалічного матеріалу механічне напруження $\sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$ визначається за однією з чотирьох гілок графіка (рис. 2.2). Площа між чотирма гілками графіка (рис. 2.2) також визначає ультразвукові нелінійні втрати енергії ультразвукової хвилі.

Зв’язок нелінійних параметрів $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$ з параметрами ультразвукової хвилі встановлюється наступним чином. Вимірюються амплітуда ε_2 другої гармоніки $\varepsilon(x, \theta)$, фаза φ_2 другої гармоніки $\varepsilon(x, \theta)$, декремент загасання δ і зміна швидкості $\Delta c/c$, що входять до системи рівнянь (2.8), (2.9) і (2.10):

$$\varepsilon(x, \theta) = \left(1 - \frac{a_1 \varepsilon_m k x}{2\pi}\right) (\varepsilon_m \sin(\theta - b_1 \varepsilon_m k x) + \varepsilon_m^2 k x \sum_{n=2}^{\infty} n \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \sin(n(\theta - b_1 \varepsilon_m k x) + \Psi_n)) \quad (2.8)$$

$$\delta = a_I \varepsilon_m. \quad (2.9)$$

$$\frac{\Delta c}{c} = b_I \varepsilon_m. \quad (2.10)$$

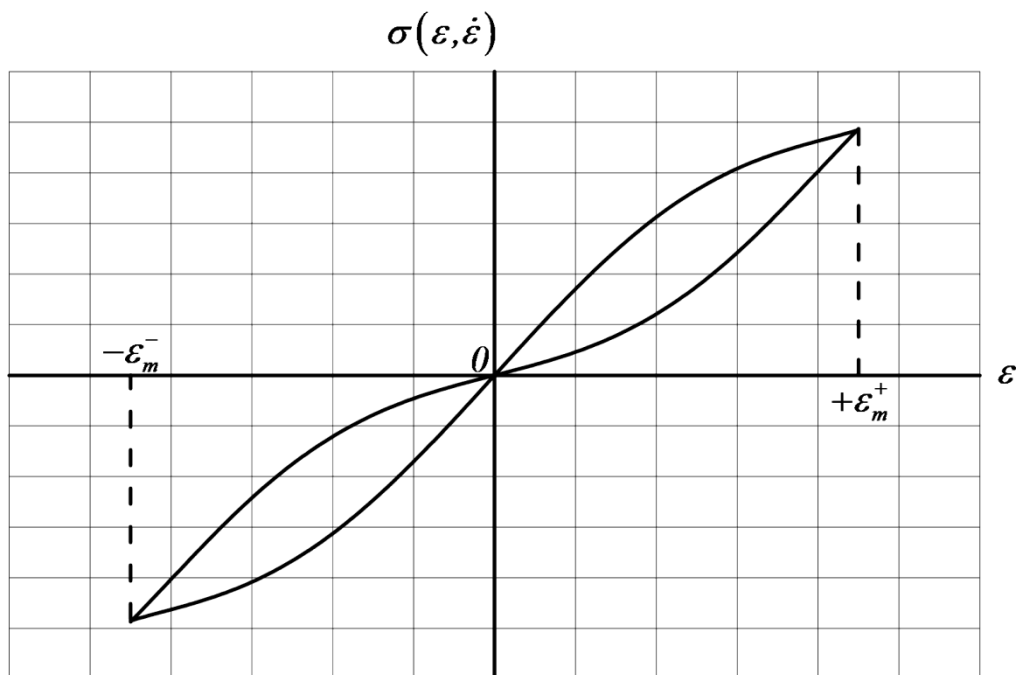


Рис. 2.2. Навантажувальна залежність рівняння стану для гістерезису відриву $\sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$

Отримана система рівнянь (2.8), (2.9) і (2.10) розв'язується чисельним методом, внаслідок чого знаходять $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$. Експериментальні дослідження полікристалічних матеріалів (сплавів міді і цинку) показують, що значення нелінійних параметрів $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$ здебільшого лежать в діапазоні $100 \dots 5000$. Рівняння стану для гістерезису відриву (2.1) адекватно описує розповсюдження ультразвукової хвилі лише на «малих» відстанях від випромінювача в «близькому» полі, де «малість» відстані x визначається як

$$x \ll \min \left\{ \frac{4}{(\gamma_1 + \gamma_2) \varepsilon_m k}, \frac{4}{(\gamma_3 + \gamma_4) \varepsilon_m k} \right\}, \quad (2.11)$$

де k – хвильове число.

Математичне моделювання зв'язків між нелінійними параметрами α, β_I, β_2 і $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$ з одного боку, і параметрами $\Delta K/K$ і $\Delta c/c$ ультразвукової хвилі з іншого боку [55] дає змогу встановити характер зв'язку цих параметрів.

Виконання моделювання передбачає [55], що ультразвукова хвиля складається з чергування пакетів N коливань з двома різними амплітудами A_{MAX} і A_{MIN} , але з однаковою частотою f і тривалістю N/f , як показано на рис. 2.3.

Функція $F(t)$, що описує більший і менший пакети ультразвукових коливань протягом періоду $[-N/f; +N/f]$, має вигляд

$$F(t) = \begin{cases} A_{MAX} \sin(2\pi t) & \text{при } -N/f \leq t < 0; \\ A_{MIN} \sin(2\pi t) & \text{при } 0 \leq t < +N/f. \end{cases} \quad (2.12)$$

Співвідношення амплітуд пакетів коливань в ультразвуковій хвилі становить A_{MAX}/A_{MIN} . При цьому передбачається, що в розглянутій ультразвуковій хвилі більші пакети зменшуються за амплітудою в A_{MAX}/A_{MIN} раз, а менші з пакетів залишаються незмінними.

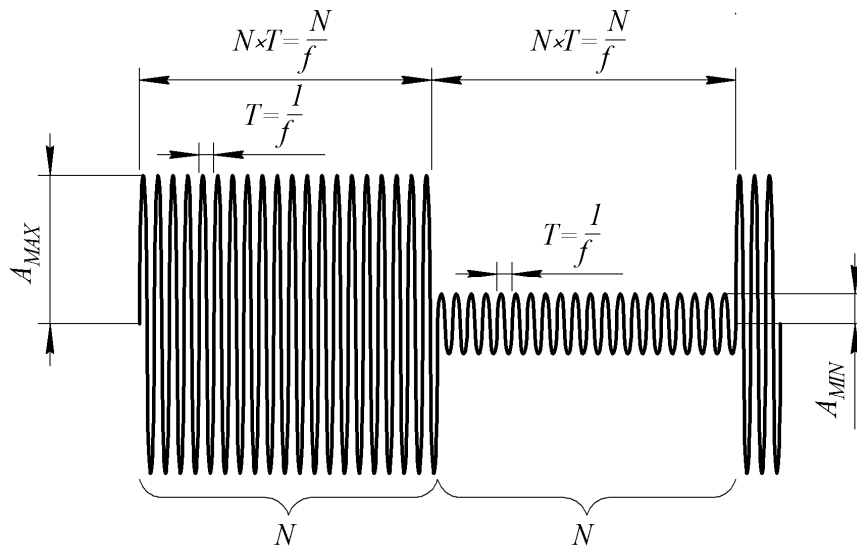


Рис. 2.3. Розподіл пакетів коливань в ультразвуковій хвилі

Отже, якщо структурно-неоднорідний полікристалічний матеріал є ультразвуково лінійним, то випромінювання пакетів ультразвукових коливань із подальшим вирівнюванням амплітуди прийнятих пакетів ультразвукових коливань формує безперервну ультразвукову хвилю. Якщо структурно-неоднорідний полікристалічний матеріал є ультразвуково нелінійним, то прийняті пакети ультразвукових коливань відрізнятимуться як за амплітудою, так і за фазою.

Відмінність в амплітуді прийнятих пакетів ультразвукових коливань дає можливість визначити зміну $\Delta K/K$ коефіцієнта поглинання K ультразвукової хвилі, а відмінність у фазі прийнятих пакетів ультразвукових коливань дає можливість визначити зміну $\Delta c/c$ фазової швидкості c ультразвукової хвилі.

Амплітуда A_{MIN} пакетів коливань із меншою амплітудою має дорівнювати $\varepsilon_m = (10^{-8} \dots 10^{-7})$ виходячи з міркувань, що за такого рівня відносної деформації нелінійні ультразвукові властивості більшості полікристалічних матеріалів не проявляються, і з погляду ультразвуку таке середовище є лінійним (при цьому така амплітуда є достатньою для впевненого приймання ультразвукової хвилі електроультра звуковим перетворювачем).

Амплітуда A_{MAX} пакетів коливань з більшою амплітудою було обрано такою, що дорівнює чотирьом різним значенням $\varepsilon_m = 0,1 \cdot 10^{-5}$, $\varepsilon_m = 0,2 \cdot 10^{-5}$, $\varepsilon_m = 0,5 \cdot 10^{-5}$ і $\varepsilon_m = 1,0 \cdot 10^{-5}$. Виходячи з того, що за такого рівня відносної деформації ультразвукова нелінійність більшості полікристалічних матеріалів поступово зростає і проявляється найбільш характерно (при цьому при випромінюванні пружної хвилі таких амплітуд досить легко досягти).

Як характерний зразок структурно-неоднорідного полікристалічного матеріалу було обрано мідно-цинковий сплав (латунь) ЛС59-1 ДСТУ ГОСТ 2060:2007, що широко застосовується для виготовлення корпусів, кріпильних деталей, стержнів, зубчастих коліс, втулок і інших елементів виробів зі складною внутрішньою структурою.

Частота f ультразвукової хвилі було обрано такою, що дорівнює $9,0 \cdot 10^4$ Гц, і це відповідало характерним частотам прояву гістерезисної нелінійності, при цьому дисипативна нелінійність ще не проявлялась. За середньої швидкості c поздовжньої пружної хвилі в сплаві ЛС59-1, що дорівнює 4430 м/с, довжина λ такої хвилі становила

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{4,43 \cdot 10^3 \text{ м/с}}{9 \cdot 10^4 \text{ Гц}} = 0,0492 \text{ м}. \quad (2.13)$$

За характерної відстані x для спостереження ультразвукової нелінійної взаємодії, що дорівнює $1,0 \text{ м}$, на ній укладалося приблизно

$$\frac{x}{\lambda} = \frac{1,0 \text{ м}}{0,0492 \text{ м}} = 20,3 \quad (2.14)$$

довжин хвиль, що відповідало «малій» відстані від електроультразвукового перетворювача, де ультразвукова нелінійність полікристалічного матеріалу проявлялася б найбільш виразно, внаслідок чого досягалася висока роздільна здатність.

Передбачалося, що згідно з ДСТУ ГОСТ 8.395:2008 температура навколишнього середовища становить $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$, атмосферний тиск – $(101,3 \pm 10,0) \text{ кПа}$, відносна вологість – $(60 \pm 20)\%$.

2.3. Дослідження залежності між параметрами ультразвукової хвилі і нелінійними параметрами рівняння стану

Було проведено низку досліджень між параметрами ультразвукових хвиль і нелінійними параметрами рівняння стану [22–41].

1. Дослідження зв'язку між коефіцієнтом поглинання K і нелінійним параметром α за фіксованих значень нелінійних параметрів $\beta_1 = 600$ і $\beta_2 = 600$ (табл. А.1) показало, що нелінійний параметр α фактично ніяк не пов'язаний з коефіцієнтом поглинання K (рис. 2.4). Внаслідок цього отримання інформації у вигляді $\Delta K/K = f(\alpha)$ є неможливим.

2. Дослідження зв'язку між коефіцієнтом поглинання K і нелінійними параметрами β_1 і β_2 за фіксованого значення нелінійного параметра $\alpha = 600$ (табл. А.2) показало, що нелінійні параметри β_1 і β_2 доволі сильно пов'язані з коефіцієнтом поглинання K (рис. 2.5).

Слід зазначити, що дослідження зв'язку між коефіцієнтом поглинання K і нелінійними параметрами β_1 і β_2 дало змогу визначити роздільну здатність $\Delta K/K = f(\beta_1, \beta_2)$ (табл. А.3 і рис. 2.6). Роздільна здатність $\Delta K/(K \cdot \Delta\beta)$ в характерних точках зв'язку визначалася таким чином.

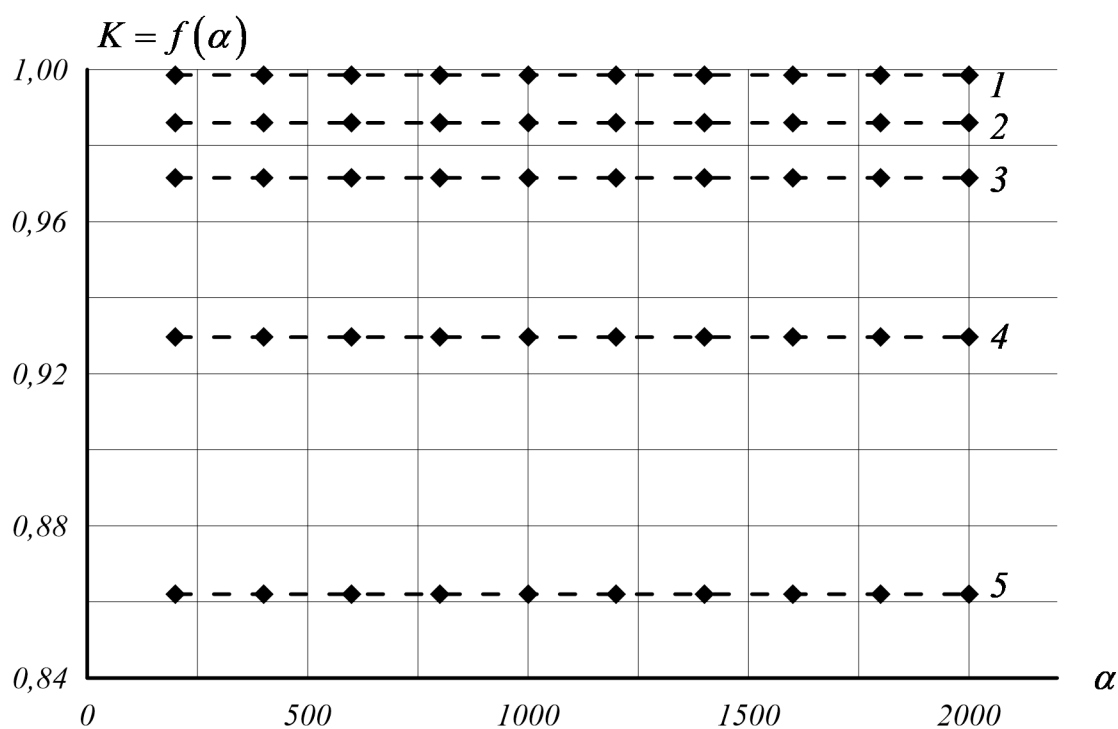


Рис. 2.4. Залежності $K = f(\alpha)$ у вигляді сімейства кривих: 1 – $\varepsilon_m = 10^{-7}$, 2 – $\varepsilon_m = 0,1 \cdot 10^{-5}$, 3 – $\varepsilon_m = 0,2 \cdot 10^{-5}$, 4 – $\varepsilon_m = 0,5 \cdot 10^{-5}$, 5 – $\varepsilon_m = 1,0 \cdot 10^{-5}$

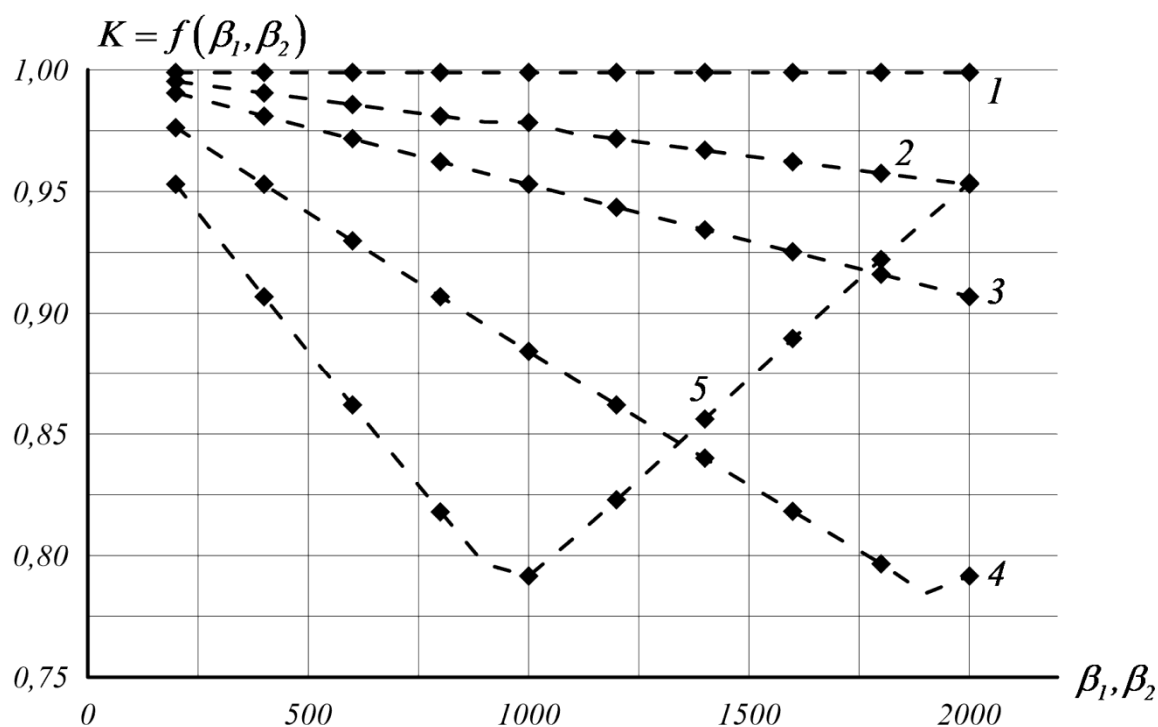


Рис. 2.5. Залежності $K = f(\beta_1, \beta_2)$ у вигляді сімейства кривих: 1 – $\varepsilon_m = 10^{-7}$, 2 – $\varepsilon_m = 0,1 \cdot 10^{-5}$, 3 – $\varepsilon_m = 0,2 \cdot 10^{-5}$, 4 – $\varepsilon_m = 0,5 \cdot 10^{-5}$, 5 – $\varepsilon_m = 1,0 \cdot 10^{-5}$

При $\varepsilon_m = 0,1 \cdot 10^{-5}$ знаходимо відношення

$$\Delta K / (K \cdot \Delta \beta) = (2,0525 - 0,3604) / (1000 - 200) = 0,002115. \quad (2.15)$$

При $\varepsilon_m = 0,2 \cdot 10^{-5}$ знаходимо відношення

$$\Delta K / (K \cdot \Delta \beta) = (4,5975 - 0,8315) / (1000 - 200) = 0,004708. \quad (2.16)$$

При $\varepsilon_m = 0,5 \cdot 10^{-5}$ знаходимо відношення

$$\Delta K / (K \cdot \Delta \beta) = (11,4618 - 2,2507) / (1000 - 200) = 0,011514. \quad (2.17)$$

При $\varepsilon_m = 1,0 \cdot 10^{-5}$ знаходимо відношення

$$\Delta K / (K \cdot \Delta \beta) = (20,7549 - 4,5955) / (1000 - 200) = 0,020199. \quad (2.18)$$

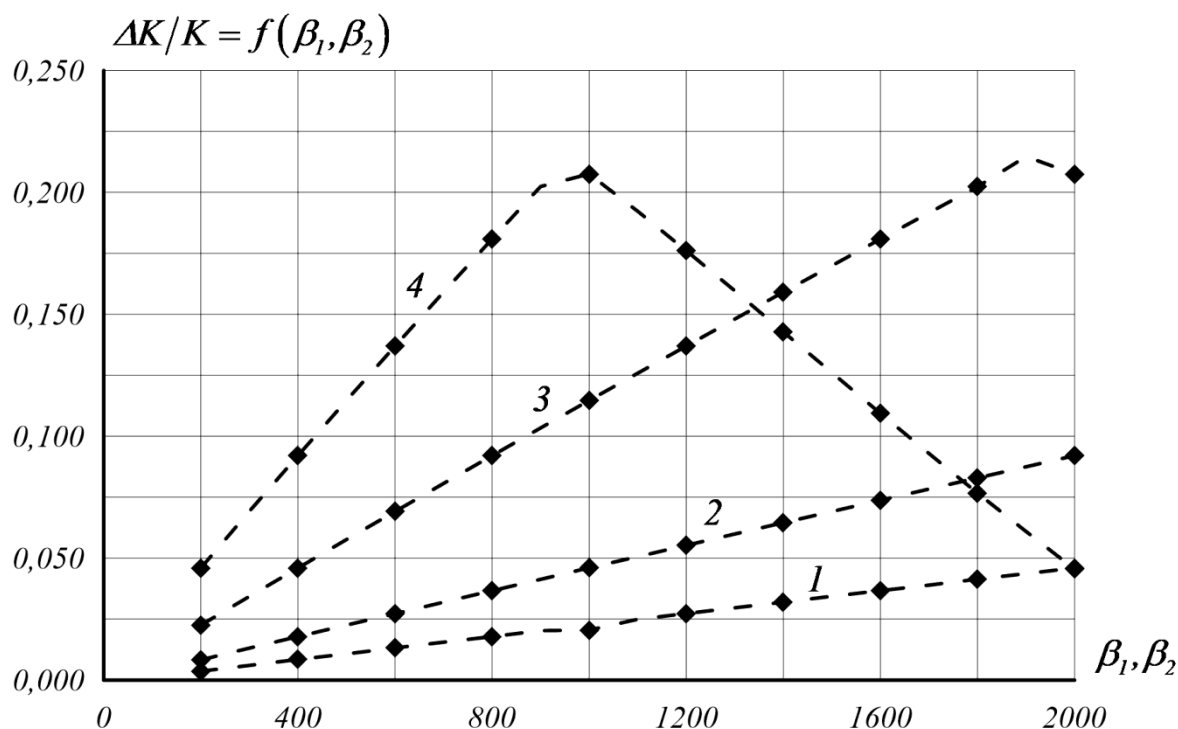


Рис. 2.6. Залежності $\Delta K/K = f(\beta_1, \beta_2)$ у вигляді сімейства кривих:

1 – $\varepsilon_m = 0,1 \cdot 10^{-5}$, 2 – $\varepsilon_m = 0,2 \cdot 10^{-5}$, 3 – $\varepsilon_m = 0,5 \cdot 10^{-5}$, 4 – $\varepsilon_m = 1,0 \cdot 10^{-5}$

Аналіз залежностей $\Delta K / (K \cdot \Delta \beta)$ показав, що зі збільшенням амплітуди відносної деформації ε_m значення $\Delta K / (K \cdot \Delta \beta)$ також збільшується. Тобто збільшення амплітуди більшого з пакетів від $\varepsilon_m = 0,1 \cdot 10^{-5}$ до $\varepsilon_m = 1,0 \cdot 10^{-5}$ призводить до збільшення роздільної здатності приблизно вдесятеро. Значення $\Delta K / (K \cdot \Delta \beta)$ для діапазону зміни β_1 і β_2 від 200 до 1000 за різних значень амплітуд ε_m більшого з пакетів показано на рис. 2.7.

Аналізуючи рис. 2.7 можна зробити висновок, що більш доцільним є зондування полікристалічних матеріалів із співвідношенням амплітуд пакетів пруж-

жних коливань $100:1$, оскільки таке співвідношення забезпечує більшу роздільну здатність, однак на практиці отримати відносну деформацію $\varepsilon_m = 1,0 \cdot 10^{-5}$ часто є досить складно.

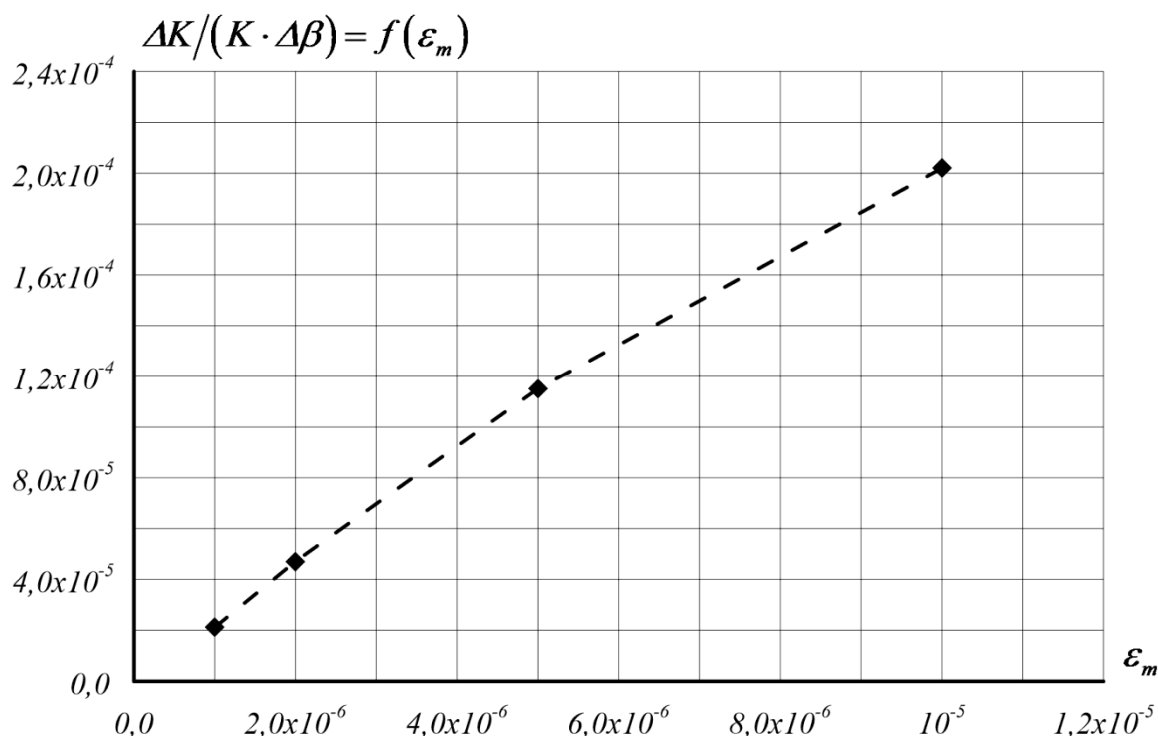


Рис. 2.7. Залежність $\Delta K / (K \cdot \Delta \beta)$ від амплітуди ε_m більшого з пакетів

3. Дослідження зв'язку між фазовою швидкістю c і нелінійним параметром α за фіксованих значень нелінійних параметрів $\beta_1 = 600$ і $\beta_2 = 600$ (табл. Б.1) показало [56], що нелінійний параметр α досить сильно пов'язаний з фазовою швидкістю c (рис. 2.8). Дослідження зв'язку між фазовою швидкістю c і нелінійним параметром α [57] дало змогу визначити роздільну здатність $\Delta c / c = f(\alpha)$ (табл. Б.2 і рис. 2.9). Роздільна здатність $\Delta c / (c \cdot \Delta \alpha)$ в характерних точках зв'язку визначалася таким чином.

При $\varepsilon_m = 0,1 \cdot 10^{-5}$ знаходимо відношення

$$\Delta c / (c \cdot \Delta \alpha) = (0,000899 - 0,000090) / (2000 - 200) = 0,4495 \cdot 10^{-6}. \quad (2.19)$$

При $\varepsilon_m = 0,2 \cdot 10^{-5}$ знаходимо відношення

$$\Delta c / (c \cdot \Delta \alpha) = (0,001896 - 0,000190) / (2000 - 200) = 0,9479 \cdot 10^{-6}. \quad (2.20)$$

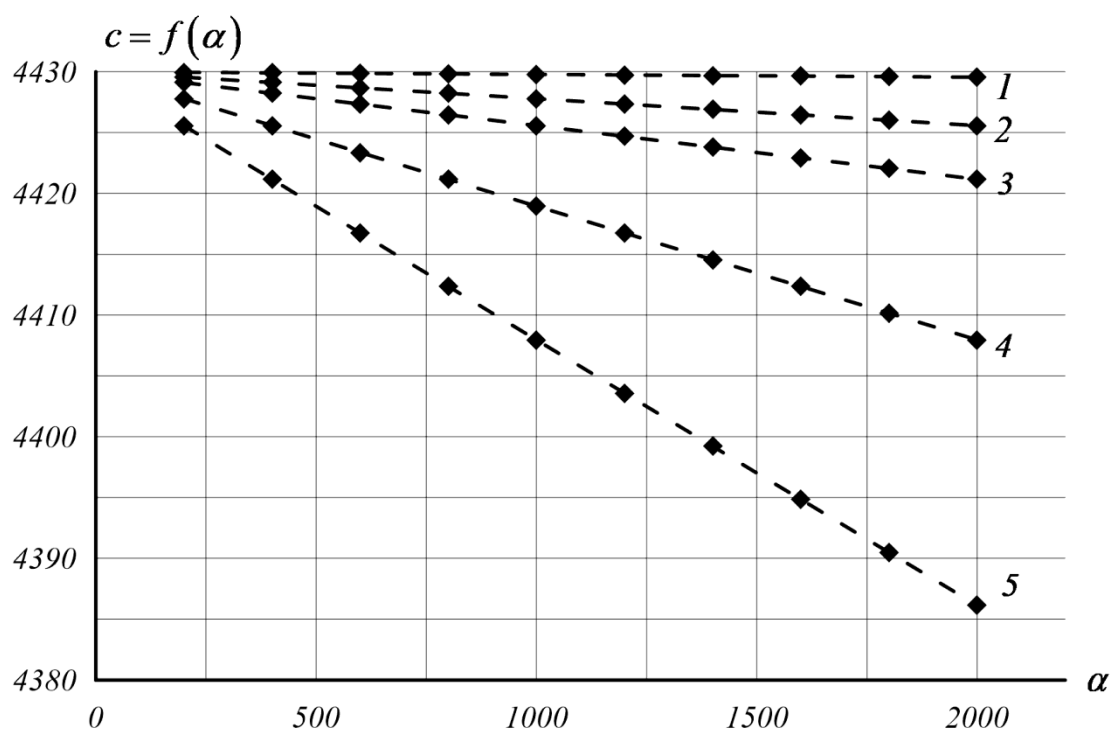


Рис. 2.8. Залежності $c = f(\alpha)$ у вигляді сімейства кривих: 1 – $\varepsilon_m = 10^{-7}$, 2 – $\varepsilon_m = 0,1 \cdot 10^{-5}$, 3 – $\varepsilon_m = 0,2 \cdot 10^{-5}$, 4 – $\varepsilon_m = 0,5 \cdot 10^{-5}$, 5 – $\varepsilon_m = 1,0 \cdot 10^{-5}$

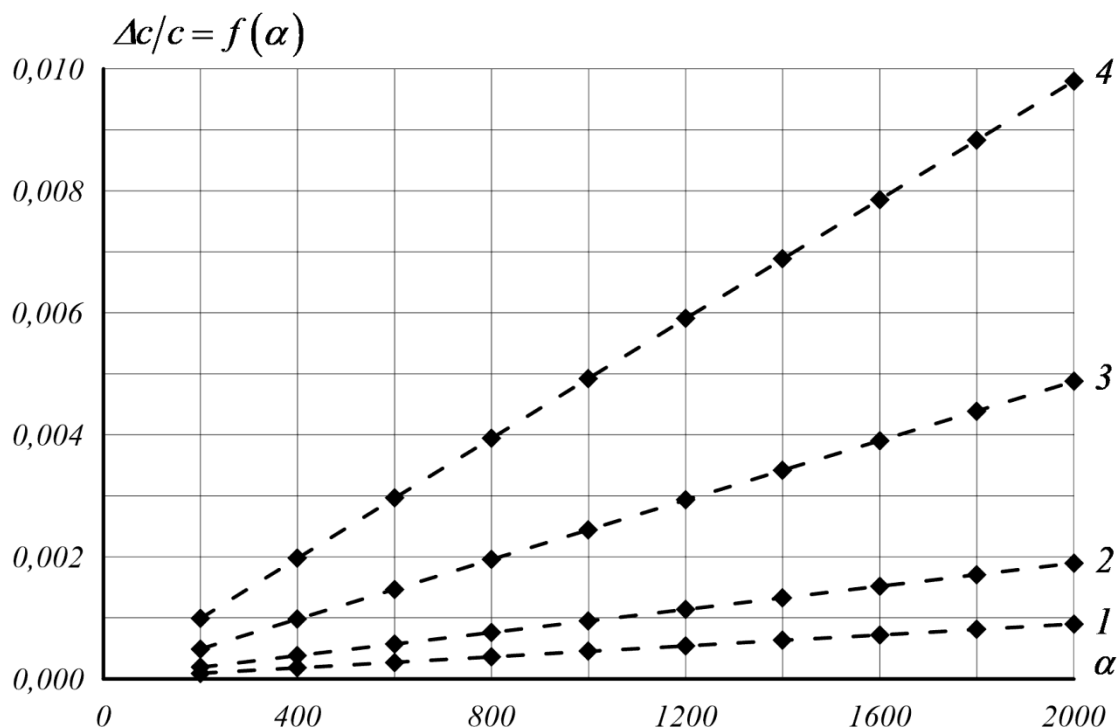


Рис. 2.9. Залежності $\Delta c/c = f(\alpha)$ у вигляді сімейства кривих: 1 – $\varepsilon_m = 0,1 \cdot 10^{-5}$, 2 – $\varepsilon_m = 0,2 \cdot 10^{-5}$, 3 – $\varepsilon_m = 0,5 \cdot 10^{-5}$, 4 – $\varepsilon_m = 1,0 \cdot 10^{-5}$

При $\varepsilon_m = 0,5 \cdot 10^{-5}$ знаходимо відношення

$$\Delta c / (c \cdot \Delta \alpha) = (0,004876 - 0,000490) / (2000 - 200) = 2,4366 \cdot 10^{-6}. \quad (2.21)$$

При $\varepsilon_m = 1,0 \cdot 10^{-5}$ знаходимо відношення

$$\Delta c / (c \cdot \Delta \alpha) = (0,009802 - 0,000989) / (2000 - 200) = 4,8961 \cdot 10^{-6}. \quad (2.22)$$

Аналіз залежності $\Delta c / (c \cdot \Delta \alpha)$ показав [58], що зі збільшенням амплітуди відносної деформації ε_m значення $\Delta c / (c \cdot \Delta \alpha)$ також збільшується. Тобто збільшення амплітуди більшого з пакетів від $\varepsilon_m = 0,1 \cdot 10^{-5}$ до $\varepsilon_m = 1,0 \cdot 10^{-5}$ призводить до збільшення роздільної здатності також приблизно в десять разів. Значення $\Delta c / (c \cdot \Delta \alpha)$ для діапазону зміни α від 200 до 2000 за різних значень амплітуд ε_m більшого з пакетів показано на рис. 2.10.

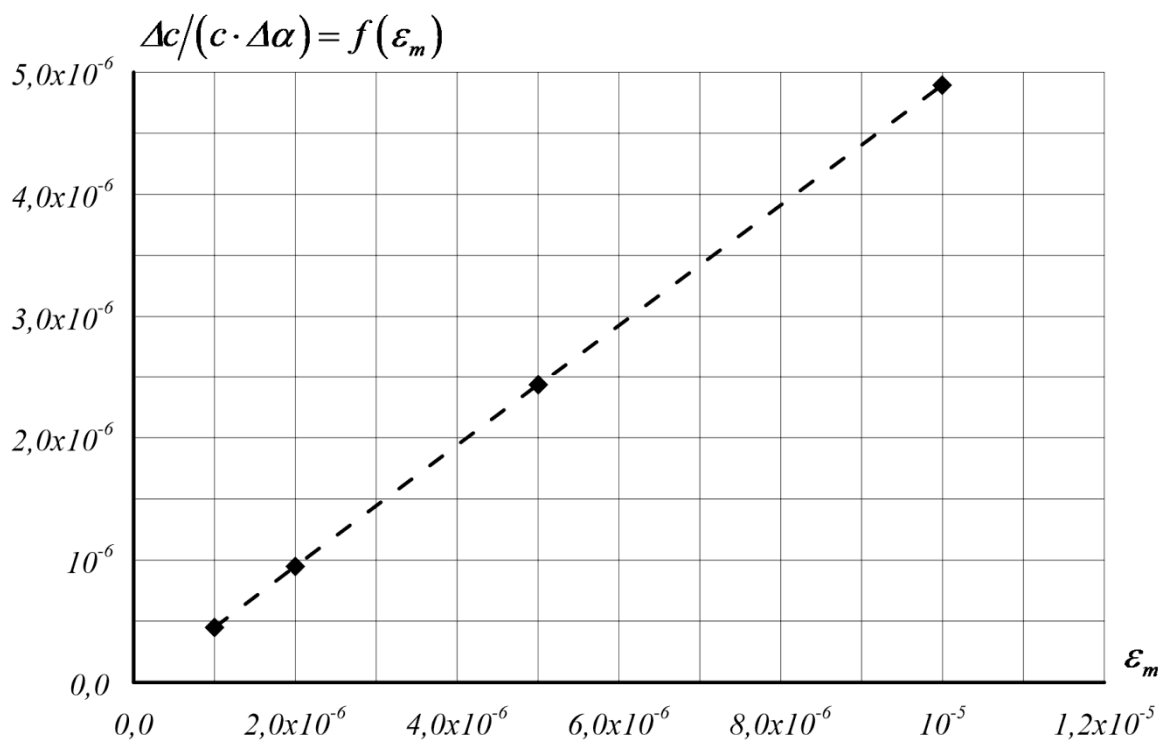


Рис. 2.10. Залежність $\Delta c / (c \cdot \Delta \alpha)$ від амплітуди ε_m більшого з пакетів

Аналізуючи рис. 2.10 можна зробити висновок, що більш доцільним є зондування полікристалічних матеріалів за співвідношення амплітуд пакетів пружних коливань $100 : 1$, оскільки таке співвідношення забезпечує більшу роздільну здатність.

4. Дослідження зв'язку між фазовою швидкістю c і нелінійними параметрами β_1 і β_2 за фіксованих значень нелінійного параметра $\alpha = 600$ (табл. Б.4) показало [59], що нелінійні параметри β_1 і β_2 фактично ніяк не пов'язані з фа-

зовою швидкістю c (рис. 2.11). Внаслідок цього отримати інформацію у вигляді $\Delta c = f(\beta_1, \beta_2)$ не є можливим.

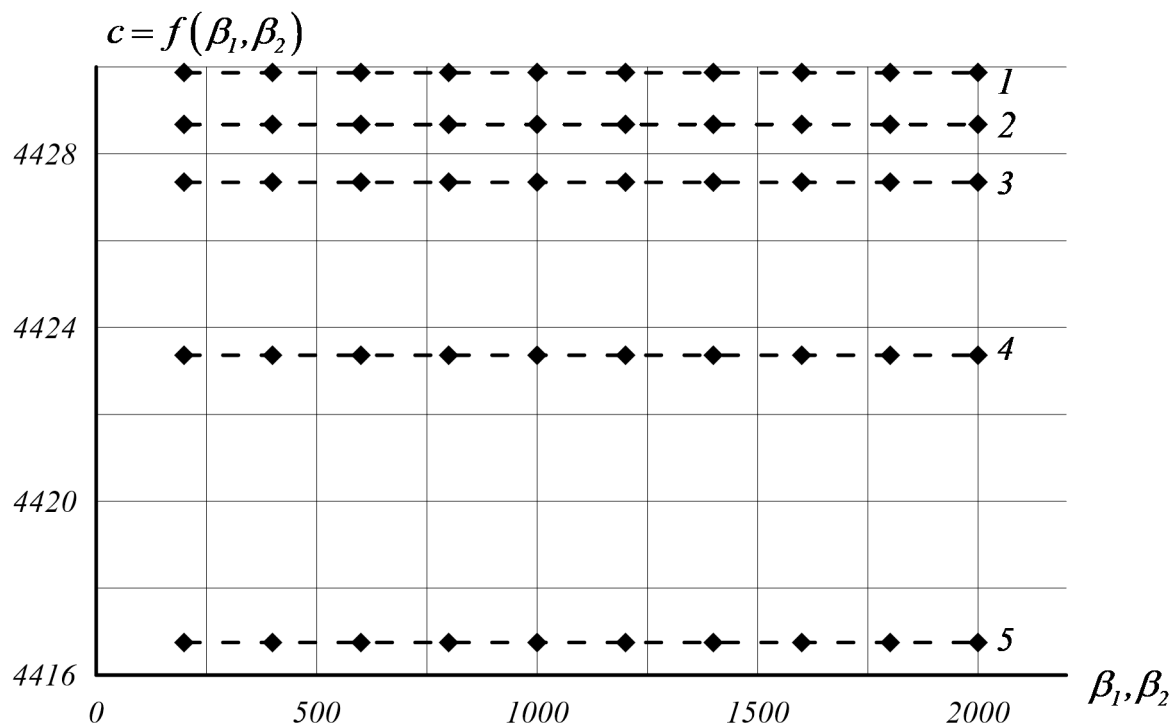


Рис. 2.11. Залежності $c = f(\beta_1, \beta_2)$ у вигляді сімейства кривих: $1 - \varepsilon_m = 10^{-7}$, $2 - \varepsilon_m = 0,1 \cdot 10^{-5}$, $3 - \varepsilon_m = 0,2 \cdot 10^{-5}$, $4 - \varepsilon_m = 0,5 \cdot 10^{-5}$, $5 - \varepsilon_m = 1,0 \cdot 10^{-5}$

5. Дослідження зв'язку між коефіцієнтом поглинання K і нелінійними параметрами γ_1 , γ_2 , γ_3 і γ_4 (табл. В.1) показало, що нелінійні параметри γ_1 , γ_2 , γ_3 і γ_4 досить сильно пов'язані з коефіцієнтом поглинання K (рис. 2.12).

При цьому дослідження зв'язку між коефіцієнтом поглинання K і нелінійними параметрами γ_1 , γ_2 , γ_3 і γ_4 дало змогу визначити роздільну здатність $\Delta K/K = f(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4)$ (табл. В.2 і рис. 2.13). Роздільна здатність $\Delta K/(K \cdot \Delta \gamma)$ в характерних точках зв'язку визначалася таким чином.

При $\varepsilon_m = 0,1 \cdot 10^{-5}$ знаходимо відношення

$$\Delta K/(K \cdot \Delta \gamma) = (0,00764 - 0,00110)/(3600 - 400) = 2,0436 \cdot 10^{-6}. \quad (2.23)$$

При $\varepsilon_m = 0,2 \cdot 10^{-5}$ знаходимо відношення

$$\Delta K/(K \cdot \Delta \gamma) = (0,01335 - 0,00206)/(3600 - 400) = 3,5281 \cdot 10^{-6}. \quad (2.24)$$

При $\varepsilon_m = 0,5 \cdot 10^{-5}$ знаходимо відношення

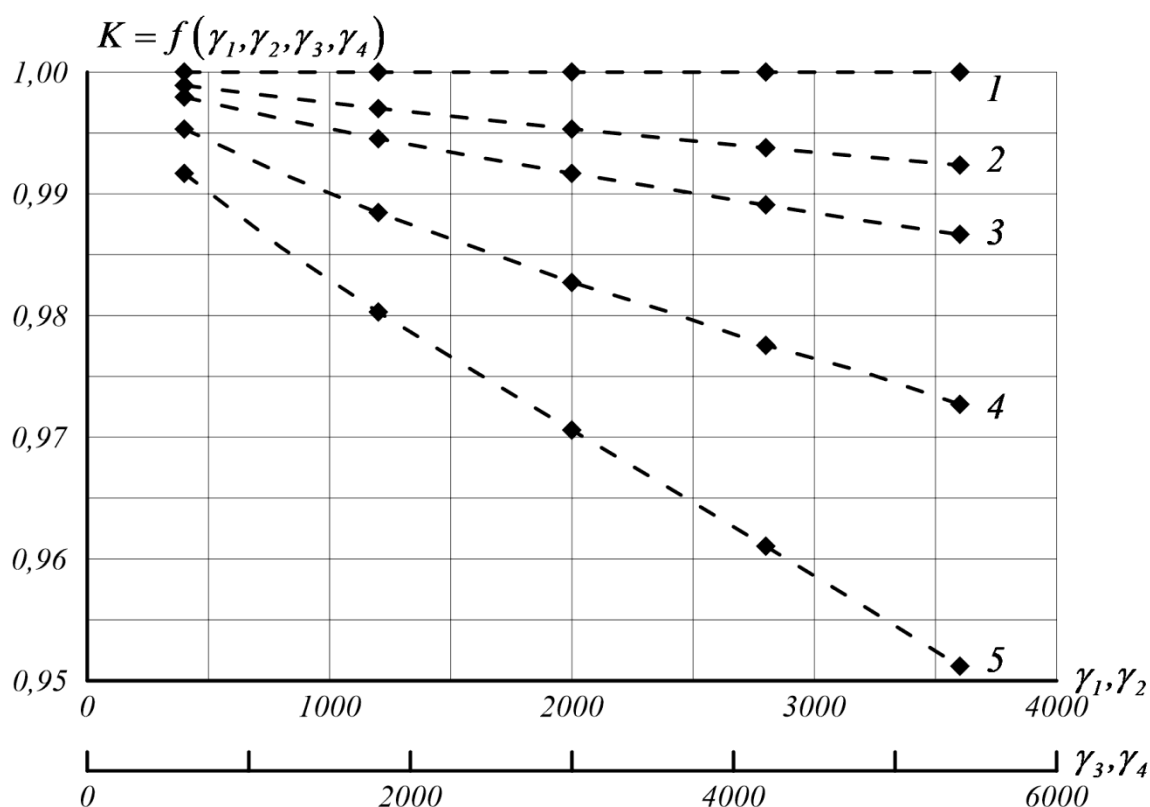


Рис. 2.12. Залежності $K = f(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4)$ у вигляді сімейства кривих: $1 - \varepsilon_m = 10^{-7}$,
 $2 - \varepsilon_m = 0,1 \cdot 10^{-5}$, $3 - \varepsilon_m = 0,2 \cdot 10^{-5}$, $4 - \varepsilon_m = 0,5 \cdot 10^{-5}$, $5 - \varepsilon_m = 1,0 \cdot 10^{-5}$

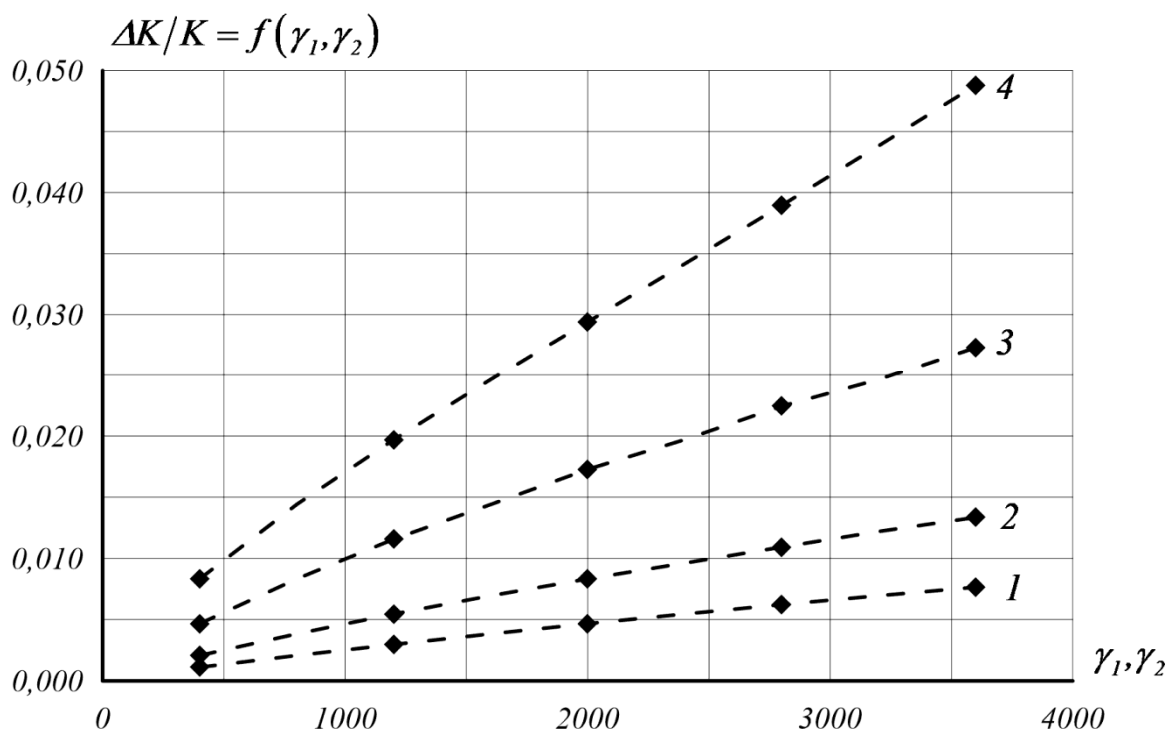


Рис. 2.13. Залежності $\Delta K/K = f(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4)$ у вигляді сімейства кривих:
 $1 - \varepsilon_m = 0,1 \cdot 10^{-5}$, $2 - \varepsilon_m = 0,2 \cdot 10^{-5}$, $3 - \varepsilon_m = 0,5 \cdot 10^{-5}$, $4 - \varepsilon_m = 1,0 \cdot 10^{-5}$

$$\Delta K / (K \cdot \Delta \gamma) = (0,02730 - 0,00466) / (3600 - 400) = 7,0750 \cdot 10^{-6}. \quad (2.25)$$

При $\varepsilon_m = 1,0 \cdot 10^{-5}$ знаходимо відношення

$$\Delta K / (K \cdot \Delta \gamma) = (0,04881 - 0,00831) / (3600 - 400) = 12,656 \cdot 10^{-6}. \quad (2.26)$$

Аналіз залежностей $\Delta K / K = f(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4)$ показав, що зі збільшенням амплітуди відносної деформації ε_m значення $\Delta K / (K \cdot \Delta \gamma)$ також збільшується. Тобто збільшення амплітуди більшого з пакетів від $\varepsilon_m = 0,1 \cdot 10^{-5}$ до $\varepsilon_m = 1,0 \cdot 10^{-5}$ призводить до збільшення роздільної здатності приблизно вдесятеро. Значення $\Delta K / (K \cdot \Delta \gamma)$ для діапазону зміни $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ і γ_4 від 400 до 3600 за різних значень амплітуд ε_m більшого з пакетів показано на рис. 2.14.

Аналізуючи рис. 2.14 можна зробити висновок, що більш доцільним є зондування полікристалічних матеріалів за співвідношення амплітуд пакетів пружних коливань $100 : 1$, оскільки таке співвідношення забезпечує більшу роздільну здатність.

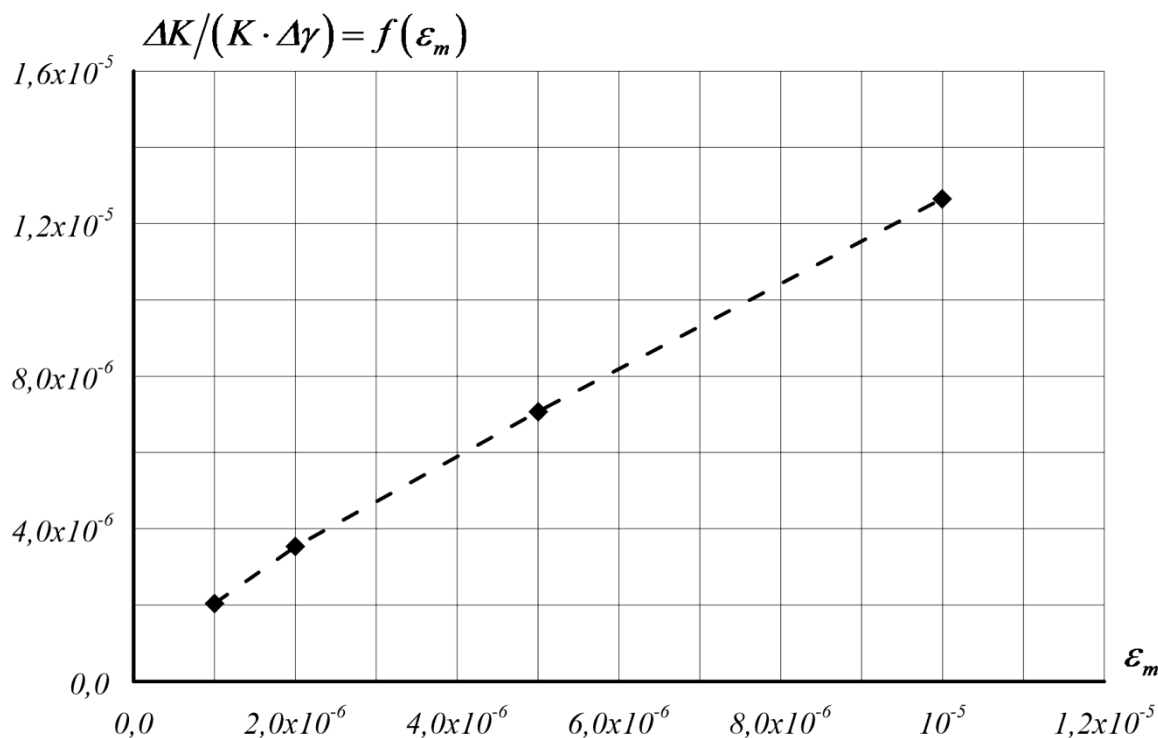


Рис. 2.14. Залежність $\Delta K / (K \cdot \Delta \gamma)$ від амплітуди ε_m більшого з пакетів

6. Дослідження зв'язку між фазовою швидкістю c і нелінійними параметрами $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ і γ_4 (табл. Г.1) показали, що нелінійні параметри $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ і γ_4 досить сильно пов'язані з фазовою швидкістю c (рис. 2.15).

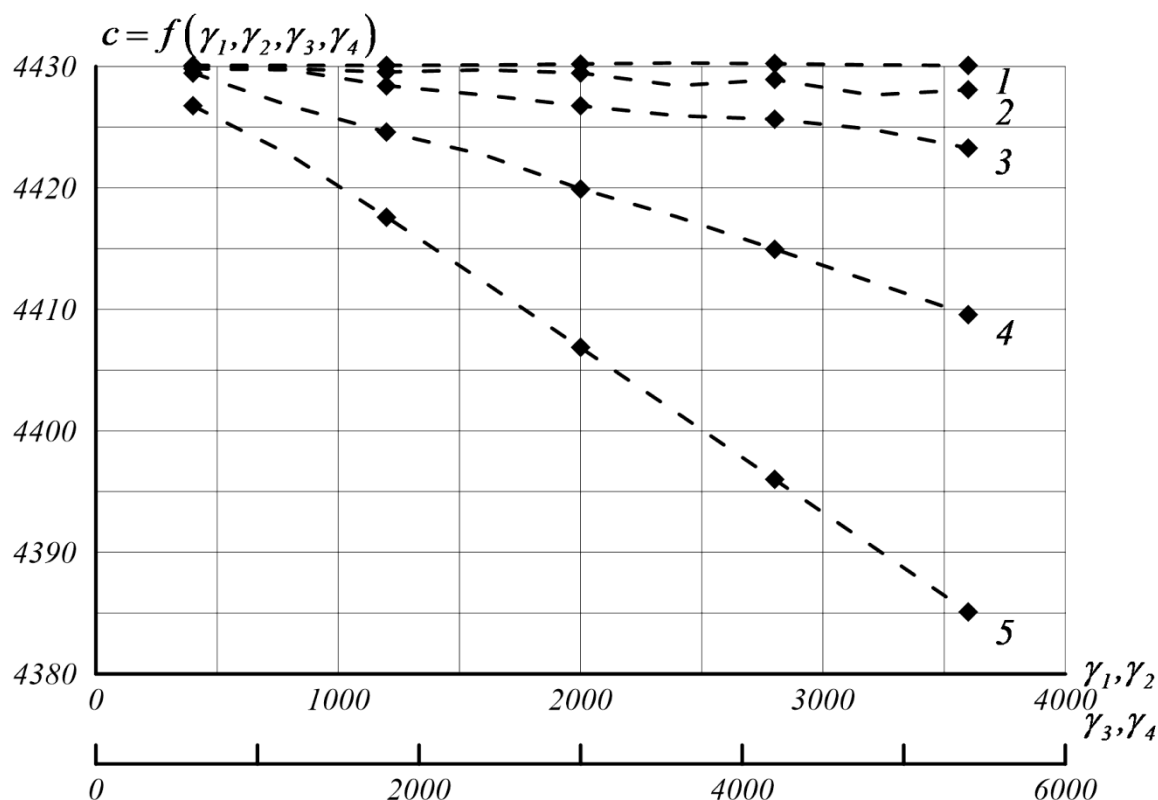


Рис. 2.15. Залежності $c = f(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4)$ у вигляді сімейства кривих: 1 – $\varepsilon_m = 10^{-7}$,
2 – $\varepsilon_m = 0,1 \cdot 10^{-5}$, 3 – $\varepsilon_m = 0,2 \cdot 10^{-5}$, 4 – $\varepsilon_m = 0,5 \cdot 10^{-5}$, 5 – $\varepsilon_m = 1,0 \cdot 10^{-5}$

При цьому дослідження зв'язку між фазовою швидкістю c і нелінійними параметрами γ_1 , γ_2 , γ_3 і γ_4 дало змогу визначити роздільну здатність $\Delta c / c = f(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4)$ (табл. Г.2 і рис. 2.16). Роздільна здатність $\Delta c / (c \cdot \Delta \gamma)$ в характерних точках зв'язку визначалася таким чином.

При $\varepsilon_m = 0,1 \cdot 10^{-5}$ знаходимо відношення

$$\Delta c / (c \cdot \Delta \gamma) = (0,000449 - 0,000012) / (3600 - 400) = 0,13656 \cdot 10^{-6}. \quad (2.27)$$

При $\varepsilon_m = 0,2 \cdot 10^{-5}$ знаходимо відношення

$$\Delta c / (c \cdot \Delta \gamma) = (0,001529 - 0,000061) / (3600 - 400) = 0,45875 \cdot 10^{-6}. \quad (2.28)$$

При $\varepsilon_m = 0,5 \cdot 10^{-5}$ знаходимо відношення

$$\Delta c / (c \cdot \Delta \gamma) = (0,00463 - 0,000139) / (3600 - 400) = 1,40344 \cdot 10^{-6}. \quad (2.29)$$

При $\varepsilon_m = 1,0 \cdot 10^{-5}$ знаходимо відношення

$$\Delta c / (c \cdot \Delta \gamma) = (0,010152 - 0,000748) / (3600 - 400) = 2,93875 \cdot 10^{-6}. \quad (2.30)$$

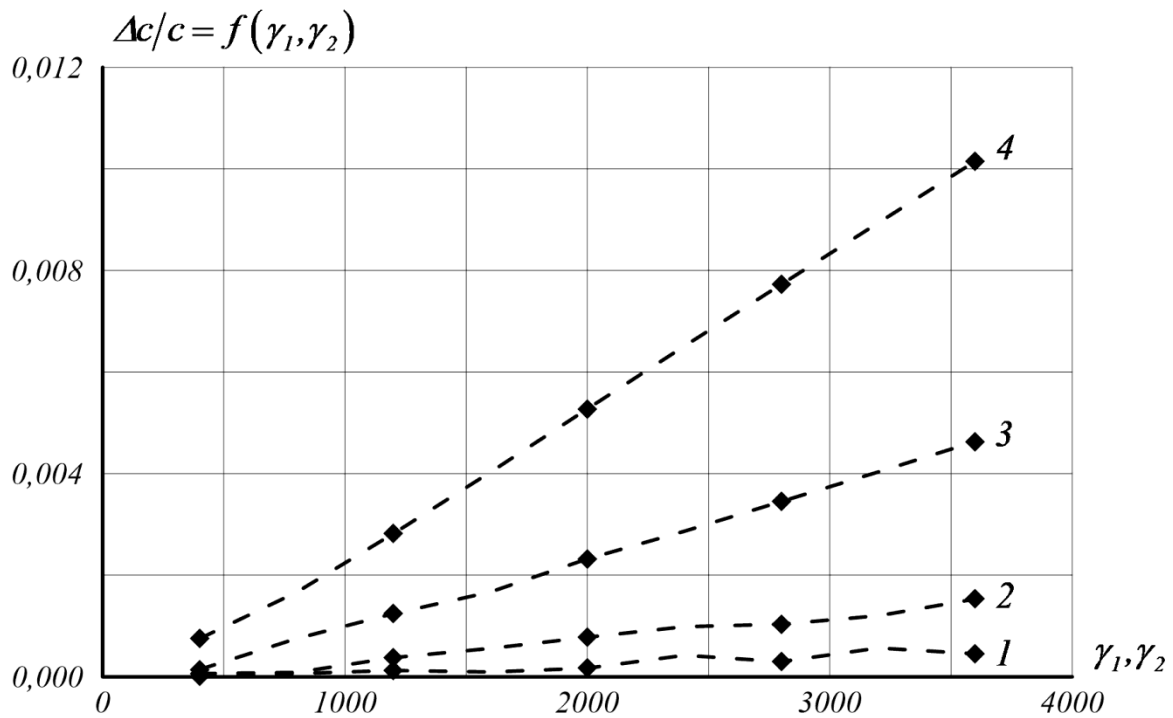


Рис. 2.16. Залежності $\Delta c/c = f(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4)$ у вигляді сімейства кривих:

$$1 - \varepsilon_m = 0,1 \cdot 10^{-5}, \quad 2 - \varepsilon_m = 0,2 \cdot 10^{-5}, \quad 3 - \varepsilon_m = 0,5 \cdot 10^{-5}, \quad 4 - \varepsilon_m = 1,0 \cdot 10^{-5}$$

Аналіз залежностей $\Delta c/c = f(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4)$ показав, що зі збільшенням амплітуди відносної деформації ε_m значення $\Delta c/(c \cdot \Delta \gamma)$ також збільшується. Тобто збільшення амплітуди більшого з пакетів від $\varepsilon_m = 0,1 \cdot 10^{-5}$ до $\varepsilon_m = 1,0 \cdot 10^{-5}$ призводить до збільшення роздільної здатності приблизно вдесятеро. Значення чутливості $\Delta c/(c \cdot \Delta \gamma)$ для діапазону зміни $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ і γ_4 від 400 до 3600 за різних значень амплітуд ε_m більшого з пакетів показано на рис. 2.17.

Аналізуючи рис. 2.17 можна зробити висновок, що більш доцільним є зондування полікристалічних матеріалів за співвідношення амплітуд пакетів пружних коливань $100 : 1$.

Розгляд зв'язків між параметрами пружної хвилі і нелінійними параметрами феноменологічного рівняння стану (2.1) дозволяє зробити такі висновки.

1. Математичне моделювання розповсюдження пружної хвилі за допомогою рівняння стану (2.1) показує приблизно однакові значення зміни $\Delta K/K$ коефіцієнта поглинання K і зміни $\Delta c/c$ фазової швидкості c пружної хвилі залежно від зміни, відповідно, нелінійних параметрів α, β_1, β_2 і $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$.

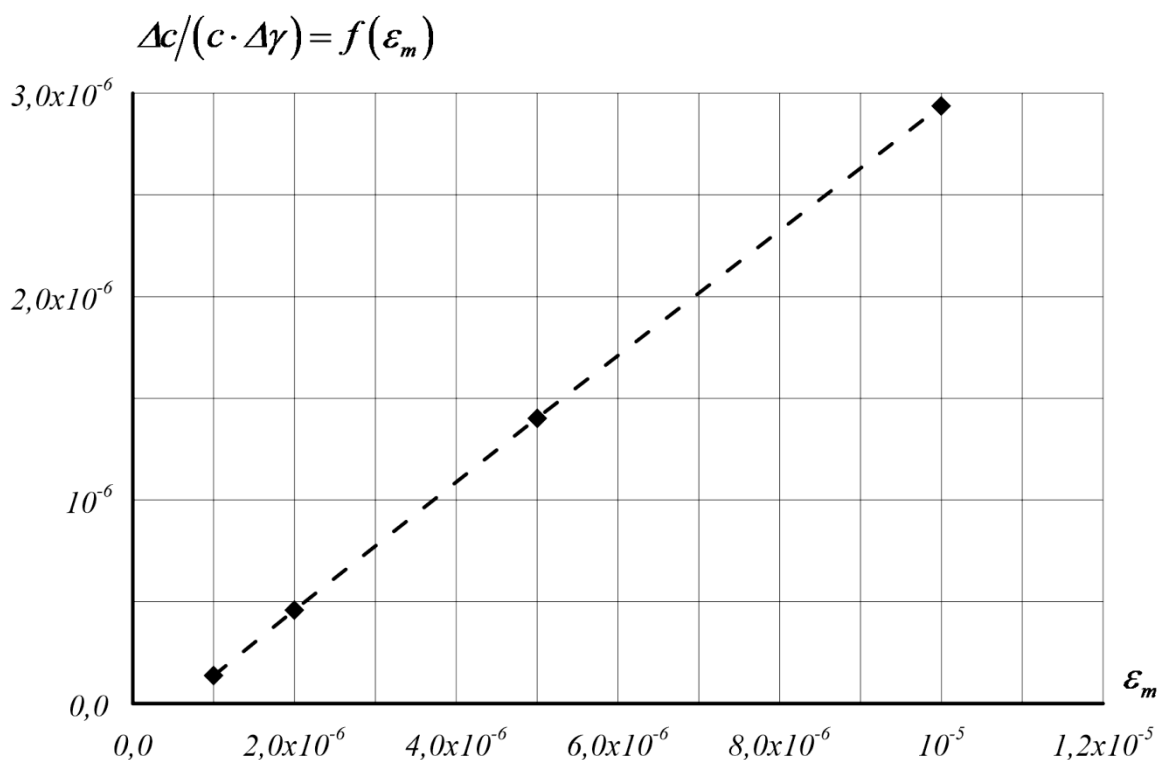


Рис. 2.17. Залежність $\Delta c / (c \cdot \Delta \gamma)$ від амплітуди ε_m більшого з пакетів

2. Збільшення значень нелінійних параметрів α , β_1 , β_2 і γ_1 , γ_2 , γ_3 , γ_4 в більшості випадків призводить до збільшення значень параметрів $\Delta K/K$ і $\Delta c/c$ пружної хвилі, причому цей зв'язок є близьким до лінійного.

3. Збільшення вдесятеро амплітуди більшого з пакетів від $\varepsilon_m = 0,1 \cdot 10^{-5}$ до $\varepsilon_m = 1,0 \cdot 10^{-5}$ за незмінної амплітуди меншого з пакетів $\varepsilon_m = 10^{-7}$ призводить до практично такого ж збільшення роздільної здатності як по зміні $\Delta K/K$, так і по зміні $\Delta c/c$.

2.4. Дослідження залежності між параметрами ультразвукової хвилі і міцністю полікристалічних матеріалів

Дані, наведені в роботі [11], свідчать про те, що для мідно-цинкового сплаву ЛС59-1 ДСТУ ГОСТ 2060:2007 при значенні границі міцності на розрив $\sigma_B \approx (600 \dots 650) \text{ МПа}$ нелінійний параметр α має значення $200 \dots 300$, нелінійні параметри β_1 і β_2 мають приблизно таке саме значення $200 \dots 300$ (вони визначаються за формулами (2.3), (2.4) і (2.5)), а нелінійні параметри γ_1 , γ_2 , γ_3 ,

γ_4 мають значення $400...600$ (вони визначаються за формулами (2.8), (2.9) і (2.10)).

Під дією тривалих механічних і (або) теплових навантажень значення межі міцності на розрив може знижуватися до $\sigma_B \approx (350...400) \text{ МПа}$. Для ЛС59-1 за $\sigma_B \approx (350...400) \text{ МПа}$ нелінійний параметр α має значення $700...800$, нелінійні параметри β_1 і β_2 мають приблизно такі самі значення $700...800$, а нелінійні параметри $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$ мають значення $3600...5400$.

Звідси випливає, що існує зв'язок між такими параметрами мідно-цинкового сплаву ЛС59-1:

1. З одного боку, існує зв'язок між міцністю структурно-неоднорідних полікристалічних матеріалів (границею міцності на розрив σ_B), діапазон значень якої становить від 350 до 650 МПа і визначає діапазон значень нелінійних параметрів α від 200 до 800 , β_1 і β_2 від 200 до 800 для гістерезису тертя, а також діапазон значень нелінійних параметрів $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ і γ_4 від 400 до 5400 для гістерезису відриву.

2. З іншого боку, існує зв'язок між параметрами пружної хвилі, такими як зміна $\Delta c/c$ фазової швидкості c пружної хвилі і зміна $\Delta K/K$ коефіцієнта поглинання K пружної хвилі, які для діапазону значень нелінійних параметрів α від 200 до 800 , β_1 і β_2 від 200 до 800 для гістерезису тертя, а також діапазон значень нелінійних параметрів $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$ від 400 до 5400 для гістерезису відриву змінюються від кількох сотих часток відсотка до кількох десятків відсотків.

Таким чином, існує зв'язок між межею міцності на розрив σ_B і параметрами пружної хвилі, такими як зміна $\Delta c/c$ фазової швидкості c пружної хвилі і зміна $\Delta K/K$ коефіцієнта поглинання K пружної хвилі, який можна встановити за допомогою нелінійних параметрів α, β_1, β_2 для гістерезису тертя і нелінійних параметри $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ і γ_4 для гістерезису відриву.

2.5. Застосування факторного експерименту при ультразвуковому контролі міцності полікристалічних матеріалів

Як було показано вище, для перевірки першої і другої гіпотез необхідно провести експериментальні дослідження. Оскільки на зміну $\Delta c/c$ фазової швидкості c пружної хвилі і на зміну $\Delta K/K$ коефіцієнта поглинання K пружної хвилі впливає декілька додаткових факторів, вплив кожного з яких є більш-менш значущим, то врахування цих додаткових факторів вимагає проведення факторного експерименту, який може бути повним або частковим, а також дворівневим або багаторівневим. До таких додаткових факторів належать амплітуда пружної хвилі (амплітуда відносної деформації) ε_m , температура T досліджуваного полікристалічного матеріалу, частота f пружної хвилі, а також деякі інші. Полікристалічні матеріали виявляють як гістерезисну, так і дисипативну нелінійність. Використання рівняння стану (2.1) передбачає, що домінуючий внесок в нелінійні ультразвукові характеристики таких матеріалів робить саме гістерезисна нелінійність, яка за відсутності явних дефектів у вигляді тріщин, бульбашок газу, несучільностей тощо визначається властивостями границь між зернами. Оскільки резонансні частоти елементів границь між зернами, наприклад, дислокацій або їхніх груп, характерні для прояву дисипативної нелінійності, становлять десятки і сотні мегагерців, а необхідно оцінювати лише гістерезисну нелінійність, то робочий діапазон частот під час проведення експериментальних досліджень обмежується верхнім значенням в сотні кілогерців.

Було зроблено припущення, що «дефекти» у вигляді границь між зернами розподілені в полікристалічних матеріалах рівномірно (питома довжина границь зерен в одиниці об'єму приблизно однакова) і ізотропно (кути повороту зерен в одиниці об'єму полікристалічного матеріалу розподілені приблизно однаково за всіма напрямками). Об'ємна концентрація міжзернових границь не перевищує $10^{-4} \dots 10^{-5}$ (за більшої концентрації рівняння стану (2.1) стає неадекватним).

Ультразвукові нелінійні ефекти у вигляді зміни $\Delta c/c$ і $\Delta K/K$, які можна безпосередньо виміряти, проявляються в полікристалічних матеріалах при $\varepsilon_m \geq 10^{-8}$. При $\varepsilon_m \leq 10^{-8}$ ультразвукові нелінійні ефекти або повністю відсутні (матеріал ультразвуково лінійний), або перебувають на одному рівні з нелінійними спотвореннями електроультразвукових перетворювачів і електричних компонентів, що використовуються у вимірювальному каналі, тому при $\varepsilon_m \leq 10^{-8}$ виявити зміни $\Delta c/c$ і $\Delta K/K$ не вдається. Амплітуду відносної деформації $\varepsilon_m \geq 10^{-5}$ в полікристалічних матеріалах досить складно, а іноді і неможливо отримати, оскільки для цього потрібні лінійні/кільцеві ультразвукові резонатори або спеціальні фокусувальні випромінювачі, які є дорогими, складними у виготовленні і експлуатації тощо.

Тому, при проведенні факторного експерименту, вважаємо, що амплітуда відносної деформації лежить в діапазоні $10^{-8} \leq \varepsilon_m \leq 10^{-5}$.

Проведення факторного експерименту передбачає зондування досліджуваного структурно-неоднорідного полікристалічного матеріалу пакетами пружних коливань із заданим співвідношенням амплітуд з подальшим вирівнюванням прийнятих пакетів за амплітудою в ту ж саму кількість разів у «ближньому полі», коли пружну хвилю можна представити як плоску або у вигляді слабо розбіжного дифракційного пучка (повний кут розходження не більше $(3 \dots 5)^\circ$).

Під час обробки результатів факторного експерименту передбачається використання математичного пакета MatLab.

Цільова функція, що застосовується до ультразвукового нелінійного контролю міцності структурно-неоднорідних полікристалічних матеріалів, повинна відповідати низці вимог: мати чіткий фізичний зміст, відрізнятися статистичною ефективністю, бути однозначною, дійсно визначати екстремум.

Оскільки додаткові фактори, такі як ε_m , T і f , а також деякі інші, одночасно впливають як на зміну $\Delta c/c$ фазової швидкості c пружної хвилі, так і на зміну $\Delta K/K$ коефіцієнта поглинання K пружної хвилі, то необхідне проведен-

ня факторного експерименту окремо для зміни $\Delta c/c$ фазової швидкості і зміни $\Delta K/K$ коефіцієнта поглинання.

Загальний вигляд цільової функції $y_{\Delta c/c}$, що враховує вплив на зміну $\Delta c/c$ фазової швидкості c межі міцності на розрив σ_B , а також додаткових факторів ε_m , T і f має вигляд:

$$y_{\Delta c/c} = f(x_1, x_2, x_3, \dots), \quad (2.31)$$

де x_1 , x_2 , x_3 – вхідні фактори.

Загальний вигляд цільової функції $y_{\Delta K/K}$, що враховує вплив на зміну $\Delta K/K$ коефіцієнта поглинання K межі міцності на розрив σ_B , а також додаткових факторів ε_m , T і f має вигляд:

$$y_{\Delta K/K} = f(x_1, x_2, x_3, \dots). \quad (2.32)$$

Було встановлено чотири основні фактори, наведені нижче (здогадно в порядку зменшення значущості їхнього впливу на зміну $\Delta c/c$ фазової швидкості c і зміну $\Delta K/K$ коефіцієнта поглинання K): межа міцності на розрив σ_B , амплітуда відносної деформації ε_m , температура T , частота f пружної хвилі (перша гармоніка).

Кожен з них має такі властивості, як незалежність, вимірюваність, керованість і сумісність (можливість здійснити всі заплановані комбінації рівнів факторів, тобто всі досліді).

Деякі інші фактори, як-от кількість N коливань в кожному з пакетів пружних коливань, співвідношення A_{MAX}/A_{MIN} амплітуд коливань в кожному з пакетів пружних коливань тощо, в результаті проведеного аналізу було визнано незначними або такими, впливом яких можна знехтувати.

Кожен із чотирьох основних вхідних факторів σ_B , ε_m , T і f може мати безліч значень, що називається його областю визначення. Така область може бути як дискретною (наприклад, прийняті фіксовані значення амплітуди відносної деформації ε_m), так і неперервними (наприклад, частота f). Межі кожної з

областей визначаються або принциповими обмеженнями (наприклад, неможливо отримати межу міцності на розрив σ_B , що перевищує фізично досяжну, або техніко-економічними (наприклад, підвищення амплітуди відносної деформації ε_m вимагає застосування спеціальних фокусувальних випромінювачів).

Для встановлення області визначення вхідних факторів застосовується метод апіорного ранжування. Суть методу полягає в отриманні і статистичній обробці максимально великого обсягу інформації, що стосується вхідних факторів, при проведенні первинної обробки результатів пошуку, перевірці адекватності і узгодженості результатів пошуку з різних джерел інформації, уточненні за результатами виконаного аналізу області визначення вхідних факторів.

Аналіз області визначення вхідних факторів показав, що кількість рівнів факторів можна прийняти рівною 2, оскільки така кількість рівнів є достатньою для побудови лінійної моделі факторного експерименту, а також для застосування повного факторного експерименту, в якому реалізуються всі можливі комбінації рівнів факторів. Оскільки кількість вхідних факторів $k = 4$ (сюди входять σ_B , ε_m , T і f), то кількість N дослідів повного факторного експерименту визначається таким чином:

$$N = 2^k = 2^4 = 16. \quad (2.33)$$

В кожному досліді факторного експерименту необхідно кілька разів виконати його дублювання, під яким розуміють не серію вимірювань в цьому досліді, а його повне повторення: підбір зразка із заданим значенням межі міцності при розриві σ_B , встановлення параметрів пружної хвилі ε_m і f , задання необхідного значення температури T .

Також приймається, що в кодованому масштабі максимальний (верхній) рівень $X_{i_{MAX}}$ кожного i -го фактора відповідає $+1$, мінімальний (нижній) рівень $X_{i_{MIN}}$ кожного i -го фактора відповідає -1 , а середній (основний) рівень X_{i_0} кожного i -го фактора відповідає 0 .

Зв'язок між значеннями факторів в кодованому масштабі (x_i) з їхніми

значеннями в натуральному масштабі (X_i) здійснюється за допомогою прямого і оберненого перетворень:

$$\begin{cases} x_i = \frac{X_i - X_{i_0}}{\Delta X_i}, \\ X_i = X_{i_0} + \Delta X_i x_i, \end{cases} \quad (2.34)$$

де інтервал варіювання

$$\Delta X_i = \frac{X_{i_{MAX}} - X_{i_{MIN}}}{2}. \quad (2.35)$$

Матриця факторного експерименту, що реалізує всі можливі комбінації рівнів вхідних факторів, наведена в табл. 2.1. Для виключення систематичного впливу неконтрольованих вхідних факторів під час проведення експерименту передбачено проведення дослідів у випадковому порядку, який наведено в стовпці 2 табл. 2.1.

При цьому фактор x_1 відповідає межі міцності на розрив σ_B , фактор x_2 – амплітуді ε_m відносної деформації, фактор x_3 – температурі T досліджуваного полікристалічного матеріалу, фактор x_4 – частоті f пружної хвилі.

Матриця повного факторного експерименту має переваги порівняно з іншими факторними планами, оскільки спрощує обчислення і полегшує побудову математичної моделі.

По-перше, така матриця симетрична відносно центру експерименту, оскільки

$$\sum_{u=1}^N x_{i_u} = 0, \quad (2.36)$$

де i – порядковий номер фактора, $i = 1 \dots 4$; u – порядковий номер дослідів.

По-друге, така матриця є нормованою:

$$\sum_{u=1}^N x_{i_u}^2 = N. \quad (2.37)$$

По-третє, така матриця є ортогональною:

$$\sum_{u=1}^N x_{i_u} x_{j_u} = 0, \quad i \neq j. \quad (2.38)$$

Табл. 2.1 Матриця факторного експерименту (план 2^4)

№ дослідку	Порядок реалізації	Кодовий масштаб			
		x_1	x_2	x_3	x_4
1	2	3	4	5	6
1	9	+1	+1	+1	+1
2	2	-1	+1	+1	+1
3	7	+1	-1	+1	+1
4	1	-1	-1	+1	+1
5	13	+1	+1	-1	+1
6	14	-1	+1	-1	+1
7	3	+1	-1	-1	+1
8	6	-1	-1	-1	+1
9	11	+1	+1	+1	-1
10	16	-1	+1	+1	-1
11	10	+1	-1	+1	-1
12	12	-1	-1	+1	-1
13	8	+1	+1	-1	-1
14	4	-1	+1	-1	-1
15	5	+1	-1	-1	-1
16	15	-1	-1	-1	-1

Матриця повного факторного експерименту використовується як для дослідження зміни $\Delta c/c$ фазової швидкості c від чотирьох основних вхідних факторів σ_B , ε_m , T і f , так і для дослідження зміни $\Delta K/K$ коефіцієнта поглинання K від тих самих факторів.

Для перевірки першої і другої гіпотез щодо зв'язку межі міцності на розрив σ_B полікристалічних конструкційних матеріалів зі зміною $\Delta c/c$ фазової швидкості c пружної хвилі, а також зі зміною $\Delta K/K$ коефіцієнта поглинання K пружної хвилі залежностями, близькими до лінійних, при побудові моделі повного факторного експерименту було вирішено обмежитися лінійною моделлю, яка враховує взаємний вплив кожного з чотирьох основних вхідних факторів σ_B , ε_m , T і f один на одного.

Для цільової функції $y_{\Delta c/c}$ модель має наступний вигляд:

$$y_{\Delta c/c} = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_4 x_4 + a_{12} x_1 x_2 + a_{13} x_1 x_3 + a_{14} x_1 x_4 + a_{23} x_2 x_3 + a_{24} x_2 x_4 + a_{34} x_3 x_4, \quad (2.39)$$

а для цільової функції $y_{\Delta K/K}$ модель має такий вигляд:

$$y_{\Delta K/K} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{14} x_1 x_4 + b_{23} x_2 x_3 + b_{24} x_2 x_4 + b_{34} x_3 x_4. \quad (2.40)$$

Моделі (2.39) і (2.40) містять, відповідно, постійні коефіцієнти a_0 і b_0 , лінійні коефіцієнти a_1, a_2, a_3, a_4 і b_1, b_2, b_3, b_4 , а також коефіцієнти взаємного впливу факторів $a_{12}, a_{13}, a_{14}, a_{23}, a_{24}, a_{34}$ і $b_{12}, b_{13}, b_{14}, b_{23}, b_{24}, b_{34}$.

Для знаходження коефіцієнтів моделей (2.39) і (2.40) передбачається використання методу найменших квадратів, оскільки отримані в результаті використання цього методу коефіцієнти матимуть такі статистичні властивості, як консистентність, незміщеність, ефективність і достатність.

Для цільової функції $y_{\Delta c/c}$ передбачається мінімізувати функцію

$$\Phi_{\Delta c/c} = \sum_{u=1}^N \left(y_{\Delta c/c_u} - \hat{y}_{\Delta c/c_u} \right)^2 = \min, \quad (2.41)$$

а для цільової функції $y_{\Delta K/K}$ мінімізувати функцію

$$\Phi_{\Delta K/K} = \sum_{u=1}^N \left(y_{\Delta K/K_u} - \hat{y}_{\Delta K/K_u} \right)^2 = \min. \quad (2.42)$$

Для знаходження мінімуму функцій (2.41) і (2.42) передбачається прирівнювання до нуля часткових похідних за відповідними коефіцієнтами моделей (2.39) і (2.40) та розв'язання отриманих систем лінійних рівнянь матричними методами.

Для цільової функції $y_{\Delta c/c}$ це

$$\frac{\partial \Phi_{\Delta c/c}}{\partial a_0} = 0; \quad \frac{\partial \Phi_{\Delta c/c}}{\partial a_1} = 0; \quad \frac{\partial \Phi_{\Delta c/c}}{\partial a_2} = 0; \quad \dots, \quad (2.43)$$

а для цільової функції $y_{\Delta K/K}$ це

$$\frac{\partial \Phi_{\Delta K/K}}{\partial b_0} = 0; \quad \frac{\partial \Phi_{\Delta K/K}}{\partial b_1} = 0; \quad \frac{\partial \Phi_{\Delta K/K}}{\partial b_2} = 0; \quad \dots \quad (2.44)$$

В матричній формі для цільової функції $y_{\Delta c/c}$ отримуємо рівняння

$$X \cdot A = Y_{\Delta c/c}, \quad (2.45)$$

а для цільової функції $y_{\Delta K/K}$ рівняння

$$X \cdot B = Y_{\Delta K/K}. \quad (2.46)$$

Матриця X умов експерименту, однакова для обох цільових функцій, має такий вигляд:

$$X = \begin{pmatrix} x_{0_1} & x_{1_1} & x_{2_1} & x_{3_1} & x_{4_1} & x_{12_1} & x_{13_1} & x_{14_1} & x_{23_1} & x_{24_1} & x_{34_1} \\ x_{0_2} & x_{1_2} & x_{2_2} & x_{3_2} & x_{4_2} & x_{12_2} & x_{13_2} & x_{14_2} & x_{23_2} & x_{24_2} & x_{34_2} \\ x_{0_3} & x_{1_3} & x_{2_3} & x_{3_3} & x_{4_3} & x_{12_3} & x_{13_3} & x_{14_3} & x_{23_3} & x_{24_3} & x_{34_3} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{0_N} & x_{1_N} & x_{2_N} & x_{3_N} & x_{4_N} & x_{12_N} & x_{13_N} & x_{14_N} & x_{23_N} & x_{24_N} & x_{34_N} \end{pmatrix}. \quad (2.47)$$

Матриці A і B невідомих коефіцієнтів моделей (2.39) і (2.40) відповідно, мають вигляд

$$A = \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_{1234} \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ \dots \\ b_{1234} \end{pmatrix}, \quad (2.48)$$

а матриці $Y_{\Delta c/c}$ і $Y_{\Delta K/K}$ результатів дослідів мають вигляд

$$Y_{\Delta c/c} = \begin{pmatrix} y_{\Delta c/c_1} \\ y_{\Delta c/c_2} \\ y_{\Delta c/c_3} \\ \dots \\ y_{\Delta c/c_N} \end{pmatrix}, \quad Y_{\Delta K/K} = \begin{pmatrix} y_{\Delta K/K_1} \\ y_{\Delta K/K_2} \\ y_{\Delta K/K_3} \\ \dots \\ y_{\Delta K/K_N} \end{pmatrix}. \quad (2.49)$$

Розв'язки рівнянь (2.45) і (2.46) знаходимо шляхом виконання матричних операцій:

$$A = (X^T X)^{-1} (X^T Y_{\Delta c/c}), \quad B = (X^T X)^{-1} (X^T Y_{\Delta K/K}). \quad (2.50)$$

Як експериментальний зразок полікристалічного матеріалу було використано мідно-цинковий сплав (латунь) ЛС59-1 ДСТУ ГОСТ 2060:2007 м'якого і твердого сортаментів. Основна відмінність між м'яким і твердим сортаментом полягала в тому, що для м'якого сортаменту межа міцності на розрив σ_B становила $(300 \dots 400) \text{ МПа}$, а для твердого сортаменту – $(600 \dots 700) \text{ МПа}$. Експериментальний зразок являв собою пруток діаметром $d = (32,0 \pm 1,0) \text{ мм}$ і довжиною $l = (500,0 \pm 5,0) \text{ мм}$. Отже, була можливість досліджувати латунь того ж самого хімічного складу, але з різними значеннями межі міцності на розрив σ_B і, відповідно, з різною структурою зерна згідно з ГОСТ 1497-84 “Метали. Методи випробувань на розтяг”.

Було прийнято наступні значення факторів у натуральному масштабі: верхня межа міцності на розрив σ_B $X_{I_{MAX}} = 650 \text{ МПа}$, нижня межа $X_{I_{MIN}} = 350 \text{ МПа}$; верхня межа амплітуди відносної деформації ε_m $X_{2_{MAX}} = 1,0 \cdot 10^{-5}$, нижня межа $X_{2_{MIN}} = 0,1 \cdot 10^{-5}$; верхня межа температури T $X_{3_{MAX}} = +50^\circ \text{C}$, нижня межа $X_{3_{MIN}} = +10^\circ \text{C}$; верхня межа частоти f пружної хвилі $X_{4_{MAX}} = 290 \text{ кГц}$, нижня межа $X_{4_{MIN}} = 90 \text{ кГц}$.

Результати вимірювань $\Delta c/c$ на частоті $f = 90 \text{ кГц}$ для двох значень відносної деформації $\varepsilon_m = 10^{-6}$ і $\varepsilon_m = 10^{-5}$, а також для двох значень температури $T = +10^\circ \text{C}$ і $T = +50^\circ \text{C}$ представлено на рис. 2.18, а.

Результати вимірювань $\Delta c/c$ на частоті $f = 290 \text{ кГц}$ для двох значень відносної деформації $\varepsilon_m = 10^{-6}$ і $\varepsilon_m = 10^{-5}$, а також для двох значень температури $T = +10^\circ \text{C}$ і $T = +50^\circ \text{C}$ представлено на рис. 2.18, б.

Результати вимірювань $\Delta K/K$ на частоті $f = 90 \text{ кГц}$ для двох значень відносної деформації $\varepsilon_m = 10^{-6}$ і $\varepsilon_m = 10^{-5}$, а також для двох значень температури $T = +10^\circ \text{C}$ і $T = +50^\circ \text{C}$ представлено на рис. 2.19, а.

Результати вимірювань $\Delta K/K$ на частоті $f = 290 \text{ кГц}$ для двох значень

відносної деформації $\varepsilon_m = 10^{-6}$ і $\varepsilon_m = 10^{-5}$, а також для двох значень температури $T = +10^\circ\text{C}$ і $T = +50^\circ\text{C}$ представлено на рис. 2.19, б.

Для вимірювання межі міцності на розрив σ_B застосовували розривну машину УМ-5, яка мала верхню межу навантаження 50 кН і межу допустимої систематичної похибки, що не перевищувала 1% від вимірюваного навантаження. Відповідно до формули (2.34) для визначення центру факторного експерименту здійснювали центрування, тобто перенесення координат факторного простору в точку з координатами $X_{1_0} = 500\text{ МПа}$, $X_{2_0} = 0,55 \cdot 10^{-5}$, $X_{3_0} = +30^\circ\text{C}$, $X_{4_0} = 190\text{ кГц}$. Інтервали варіювання згідно з формулою (2.35) було визначено наступним чином: $\Delta X_1 = 150\text{ МПа}$, $\Delta X_2 = 0,45 \cdot 10^{-5}$, $\Delta X_3 = 20^\circ\text{C}$, $\Delta X_4 = 100\text{ кГц}$.

Планування повного факторного експерименту передбачає, зокрема, наявність дисперсій дослідів $S^2_{y_{\Delta c/c}}$ для цільової функції $y_{\Delta c/c}$ і $S^2_{y_{\Delta K/K}}$ для цільової функції $y_{\Delta K/K}$. Такі дисперсії дослідів можна отримати до проведення повного факторного експерименту за аналогічними факторними планами. Проте, з огляду на відсутність такої інформації, єдина можливість оцінити дисперсії дослідів – повторювати (дублювати) дослід, використовуючи в кожному досліді рівномірне дублювання в кількості n дублів. При рівні значущості $\alpha = 0,05$ кількість ступенів свободи визначалася як

$$\nu = n - 1. \quad (2.51)$$

Було прийнято, що кількість дублів $n = 3$, звідки, згідно з формулою (2.51), кількість ступенів свободи $\nu = 2$.

Застосування рівномірного дублювання дозволяє розрахувати дисперсії дослідів $S^2_{y_{\Delta c/c}}$ і $S^2_{y_{\Delta K/K}}$ відповідно до моделей (2.39) і (2.40) наступним чином:

$$S^2_{y_{\Delta c/c}} = \frac{\sum_{u=1}^N S^2_{y_{\Delta c/c_u}}}{N}, \quad S^2_{y_{\Delta K/K}} = \frac{\sum_{u=1}^N S^2_{y_{\Delta K/K_u}}}{N}. \quad (2.52)$$

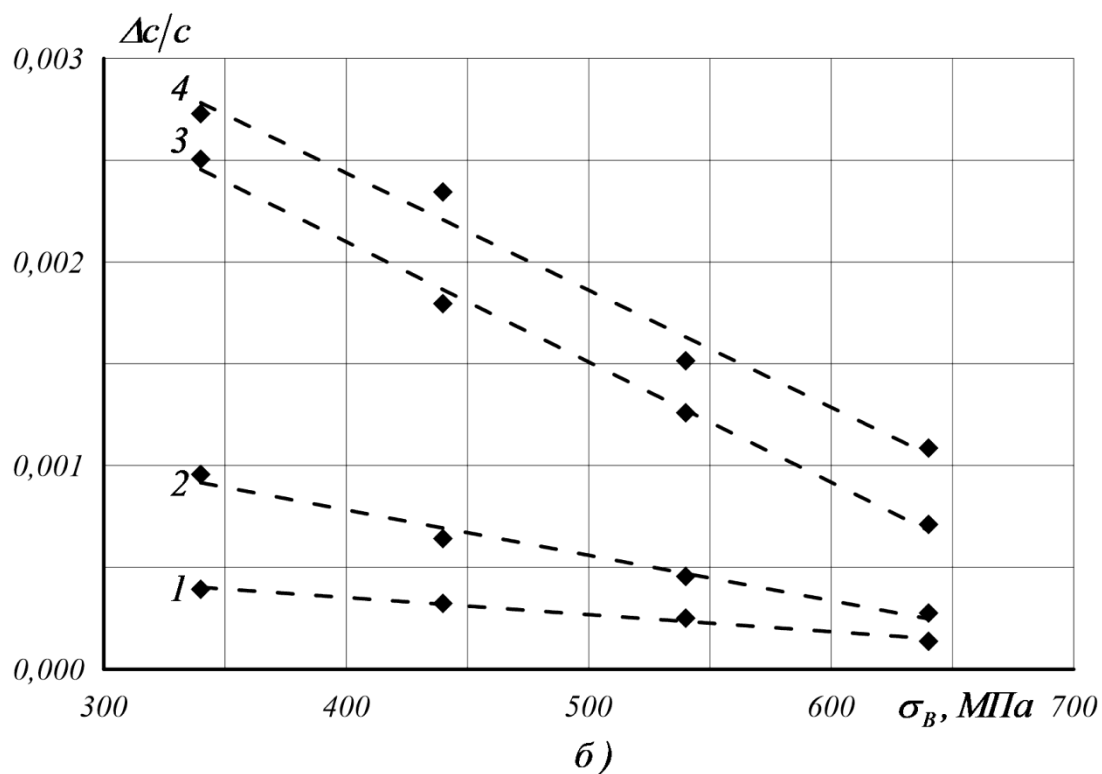
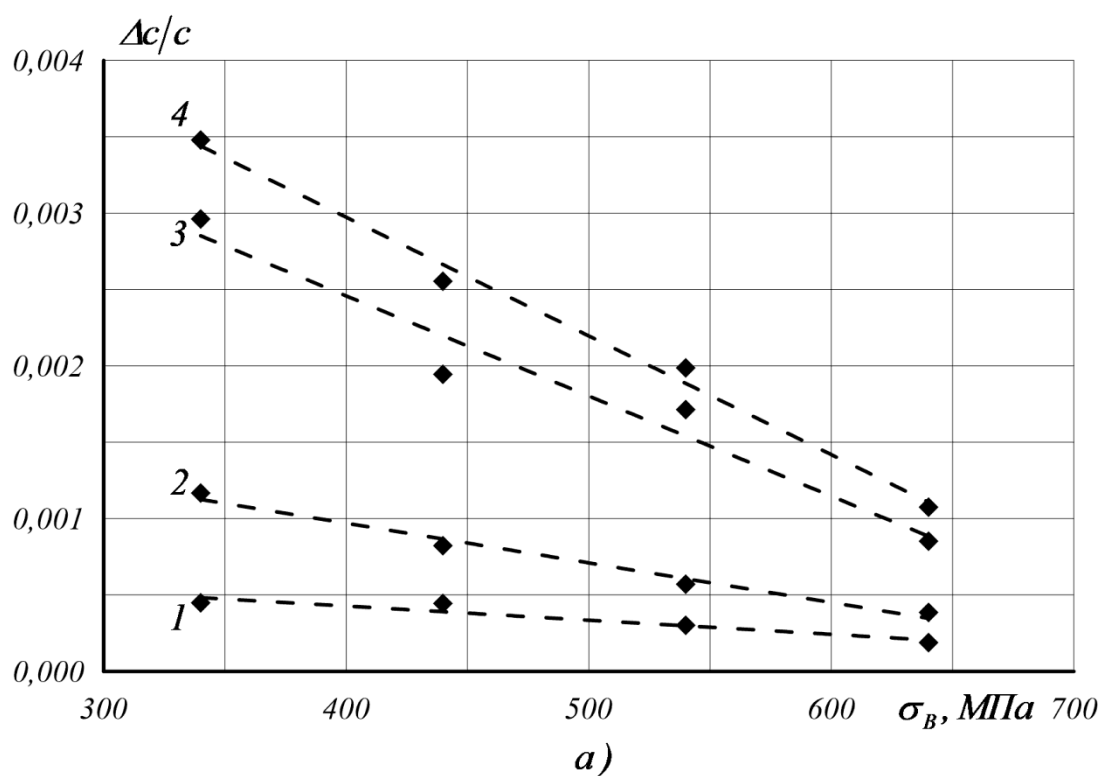


Рис. 2.18. Залежність співвідношення $\Delta c/c$ за різних значень факторів:

а) $f = 90 \text{ кГц}$: 1) $T = +10^\circ \text{C}, \varepsilon_m = 10^{-6}$; 2) $T = +50^\circ \text{C}, \varepsilon_m = 10^{-6}$;

3) $T = +10^\circ \text{C}, \varepsilon_m = 10^{-5}$; 4) $T = +50^\circ \text{C}, \varepsilon_m = 10^{-5}$;

б) $f = 290 \text{ кГц}$: 1) $T = +10^\circ \text{C}, \varepsilon_m = 10^{-6}$; 2) $T = +50^\circ \text{C}, \varepsilon_m = 10^{-6}$;

3) $T = +10^\circ \text{C}, \varepsilon_m = 10^{-5}$; 4) $T = +50^\circ \text{C}, \varepsilon_m = 10^{-5}$

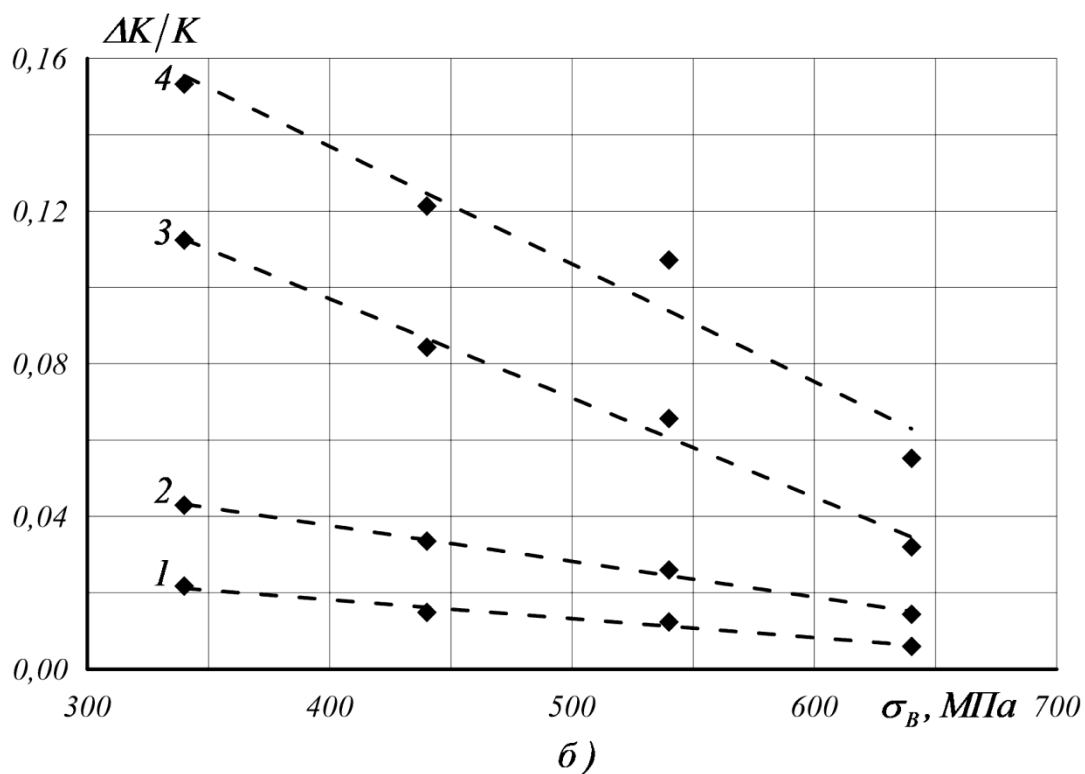
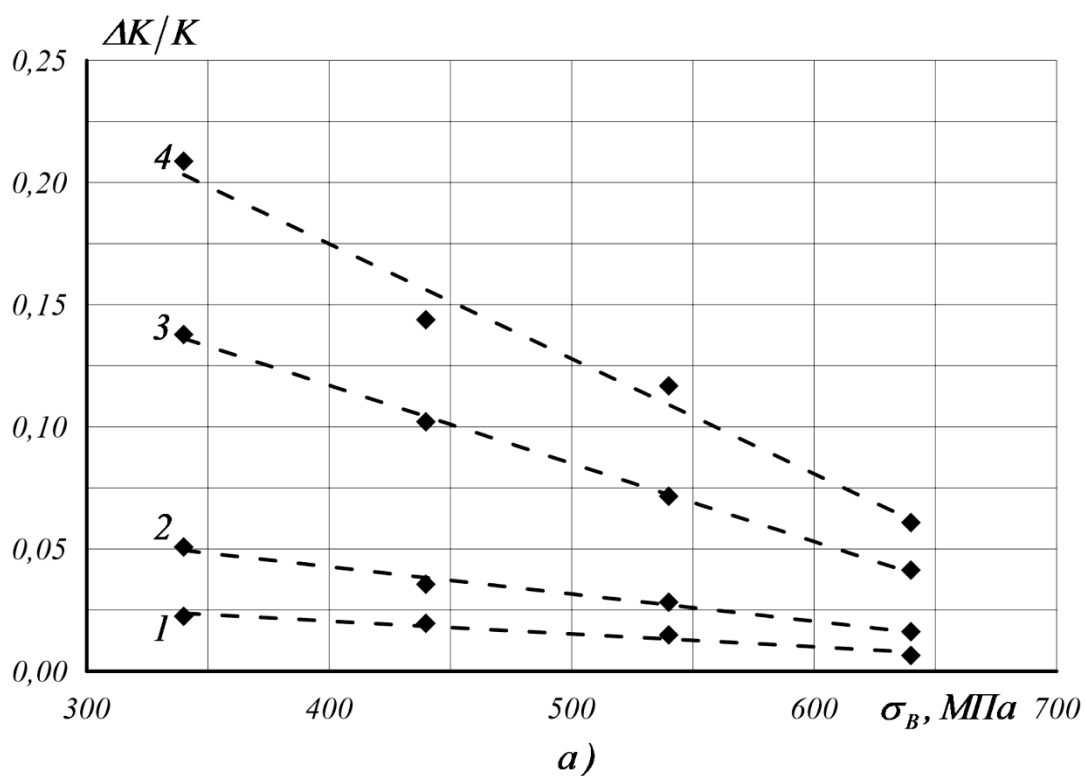


Рис. 2.19. Залежність співвідношення $\Delta K/K$ за різних значень факторів:

а) $f = 90 \text{ kHz}$: 1) $T = +10^\circ\text{C}$, $\varepsilon_m = 10^{-6}$; 2) $T = +50^\circ\text{C}$, $\varepsilon_m = 10^{-6}$;

3) $T = +10^\circ\text{C}$, $\varepsilon_m = 10^{-5}$; 4) $T = +50^\circ\text{C}$, $\varepsilon_m = 10^{-5}$;

б) $f = 290 \text{ kHz}$: 1) $T = +10^\circ\text{C}$, $\varepsilon_m = 10^{-6}$; 2) $T = +50^\circ\text{C}$, $\varepsilon_m = 10^{-6}$;

3) $T = +10^\circ\text{C}$, $\varepsilon_m = 10^{-5}$; 4) $T = +50^\circ\text{C}$, $\varepsilon_m = 10^{-5}$

Для перевірки однорідності ряду дисперсій $S_{y_{\Delta c/c_u}}^2$ і $S_{y_{\Delta K/K_u}}^2$, згідно з розрахунковим критерієм Кохрена, визначались величини

$$G_{\Delta c/c}^{PO3P} = \frac{\max(S_{y_{\Delta c/c_u}}^2)}{\sum_{u=1}^N S_{y_{\Delta c/c_u}}^2}, \quad G_{\Delta K/K}^{PO3P} = \frac{\max(S_{y_{\Delta K/K_u}}^2)}{\sum_{u=1}^N S_{y_{\Delta K/K_u}}^2}, \quad (2.53)$$

які порівнювалися, відповідно, з відомими табличними критеріями Кохрена $G_{\Delta c/c}^{ТАБЛ}$ і $G_{\Delta K/K}^{ТАБЛ}$. Ряд дисперсій $S_{y_{\Delta c/c_u}}^2$ і $S_{y_{\Delta K/K_u}}^2$ вважався однорідним, якщо розрахункові значення $G_{\Delta c/c}^{PO3P}$ і $G_{\Delta K/K}^{PO3P}$ критерію Кохрена виявлялися меншими за його табличні значення $G_{\Delta c/c}^{ТАБЛ}$ і $G_{\Delta K/K}^{ТАБЛ}$.

В результаті порівняння значень, розрахованих за формулою (2.53) критеріїв Кохрена $G_{\Delta c/c}^{PO3P} = 0,36$ і $G_{\Delta K/K}^{PO3P} = 0,34$ з відповідними табличними значеннями критеріїв Кохрена $G_{\Delta c/c}^{ТАБЛ} = 0,455$ було отримано, що певна низка дисперсій $S_{y_{\Delta c/c_u}}^2$ і низка дисперсій $S_{y_{\Delta K/K_u}}^2$ є відтворюваними.

Для перевірки статистичної значущості коефіцієнтів моделей (2.39) і (2.40), оскільки виконується умова нормування (2.37), передбачалося визначати дисперсії оцінок коефіцієнтів в такий спосіб:

$$S_{a_i}^2 = \frac{S_{y_{\Delta c/c}}^2}{n \cdot N}, \quad S_{b_i}^2 = \frac{S_{y_{\Delta K/K}}^2}{n \cdot N}, \quad (2.54)$$

де i – порядковий номер коефіцієнтів моделей (2.39) і (2.40).

Безпосередньо статистичну значущість коефіцієнтів моделей (2.39) і (2.40) передбачалося визначати шляхом порівняння абсолютної величини коефіцієнтів a_i і b_i з їх довірчими інтервалами Δ_{a_i} і Δ_{b_i} , які розраховуються за формулами

$$\Delta_{a_i} = t_{\alpha, \nu} \cdot S_{a_i}, \quad \Delta_{b_i} = t_{\alpha, \nu} \cdot S_{b_i}, \quad (2.55)$$

де t – критерій Стюдента.

Коефіцієнти моделей (2.39) і (2.40) вважалися статистично значущими, якщо виконувалася умова

$$|a_i| \geq \Delta_{a_i}, \quad |b_i| \geq \Delta_{b_i}. \quad (2.56)$$

В результаті розрахунків було отримано, що довірчий інтервал $\Delta_{a_i} = 0,000174$, а довірчий інтервал $\Delta_{b_i} = 0,00108$. Для перевірки адекватності моделей (2.39) і (2.40), згідно з розрахунковим критерієм Фішера, визначалися величини

$$F_{\Delta c/c}^{POЗP} = \frac{S_{HEAD_{\Delta c/c}}^2}{S_{y_{\Delta c/c}}^2}, \quad F_{\Delta K/K}^{POЗP} = \frac{S_{HEAD_{\Delta K/K}}^2}{S_{y_{\Delta K/K}}^2}. \quad (2.57)$$

де $S_{HEAD_{\Delta c/c}}^2$, $S_{HEAD_{\Delta K/K}}^2$ – дисперсії неадекватності.

Величини $F_{\Delta c/c}^{POЗP}$ і $F_{\Delta K/K}^{POЗP}$ порівнювалися відповідно з відомими табличними значеннями критерію Фішера $F_{\Delta c/c}^{ТАБЛ}$ і $F_{\Delta K/K}^{ТАБЛ}$. Моделі (2.39) і (2.40) вважалися адекватними, якщо відповідно виконувалися умови

$$F_{\Delta c/c}^{POЗP} \leq F_{\Delta c/c}^{ТАБЛ}, \quad F_{\Delta K/K}^{POЗP} \leq F_{\Delta K/K}^{ТАБЛ}. \quad (2.58)$$

Кількість ступенів свободи дисперсій дослідів $S_{y_{\Delta c/c}}^2$ і $S_{y_{\Delta K/K}}^2$ при цьому визначалася за формулою

$$\nu_l = N(n - l). \quad (2.59)$$

Дисперсії неадекватності визначалися за формулами

$$S_{HEAD_{\Delta c/c}}^2 = \frac{\sum_{u=1}^N (y_{\Delta c/c_u} - \hat{y}_{\Delta c/c_u})^2}{\nu_2}, \quad S_{HEAD_{\Delta K/K}}^2 = \frac{\sum_{u=1}^N (y_{\Delta K/K_u} - \hat{y}_{\Delta K/K_u})^2}{\nu_2}, \quad (2.60)$$

де кількість ступенів свободи

$$\nu_2 = N - k, \quad (2.61)$$

де k – кількість залишених коефіцієнтів рівнянь (2.39) і (2.40).

Кількість k залишених коефіцієнтів рівнянь (2.39) і (2.40) заздалегідь невідома і визначається, виходячи з умови (2.56). В результаті порівняння розрахованих за формулою (2.57) значень критеріїв Фішера $F_{\Delta c/c}^{POЗP} = 2,15$ і $F_{\Delta K/K}^{POЗP} = 1,79$ з відповідними їм табличними значеннями критеріїв Фішера $F_{\Delta c/c}^{ТАБЛ} = 2,53$ було отримано, що модель (2.39) і модель (2.40) є адекватними.

В результаті мінімізації функції $\Phi_{\Delta c/c}$ (2.41) для цільової функції $y_{\Delta c/c}$ (2.39) було отримано значення коефіцієнтів моделі, які представлені на рис. 2.20, а. А в результаті, відповідно, мінімізації функції $\Phi_{\Delta K/K}$ (2.42) для цільової функції $y_{\Delta K/K}$ (2.40) було отримано значення коефіцієнтів моделі, які представлені на рис. 2.20, б.

Для цільової функції $y_{\Delta c/c}$ модель (2.39) мала, з урахуванням значущості коефіцієнтів (2.56), наступний вигляд (при цьому довірчий інтервал дорівнював $\Delta_{a_i} = 0,000174$):

$$y_{\Delta c/c} = 0,001223 - 0,000516x_1 + 0,000717x_2 - 0,000266x_1x_2 + \\ + 0,000168x_3 - 0,000098x_4. \quad (2.62)$$

Для цільової функції $y_{\Delta K/K}$ модель (2.40) мала, з урахуванням значущості коефіцієнтів (2.56), наступний вигляд (при цьому довірчий інтервал дорівнював $\Delta_{b_i} = 0,00108$):

$$y_{\Delta K/K} = 0,065668 - 0,034820x_1 + 0,042389x_2 - 0,022456x_1x_2 + \\ + 0,016045x_3 - 0,007696x_4. \quad (2.63)$$

Підставляючи в модель (2.62) і модель (2.63) замість факторів в кодованому масштабі (x_i) їх значення в натуральному масштабі (X_i), відповідно до формули (2.34) отримуємо наступні залежності.

Зв'язок між параметром σ_B (з одного боку) та параметрами ε_m , T , f і $\Delta c/c$ (з іншого боку) виражається формулою:

$$\sigma_B \left(\frac{\Delta c}{c}, \varepsilon_m, T, f \right) = \frac{-5,0 \cdot 10^6 \frac{\Delta c}{c} + 458,6 \cdot 10^3 + 178,2 \cdot 10^9 \varepsilon_m + 4,2 \cdot 10^3 T - 490,0 f}{636,3 + 197,0 \cdot 10^6 \varepsilon_m}. \quad (2.64)$$

Зв'язок між параметром σ_B (з одного боку) та параметрами ε_m , T , f і $\Delta K/K$ (з іншого боку) виражається формулою:

$$\sigma_B \left(\frac{\Delta K}{K}, \varepsilon_m, T, f \right) = \frac{-5,0 \cdot 10^4 \frac{\Delta K}{K} + 145,0 \cdot 10^3 + 130,3 \cdot 10^9 \varepsilon_m + 4,0 \cdot 10^3 T - 384,8 f}{245,8 + 166,3 \cdot 10^6 \varepsilon_m}. \quad (2.65)$$

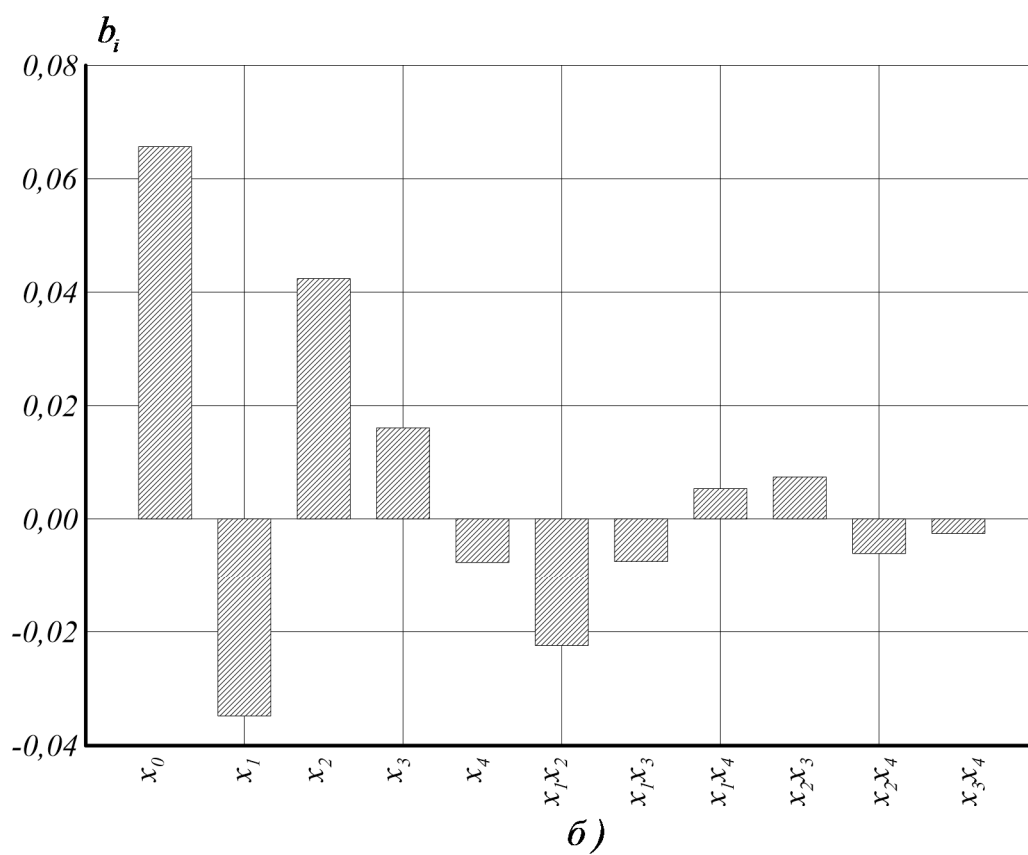
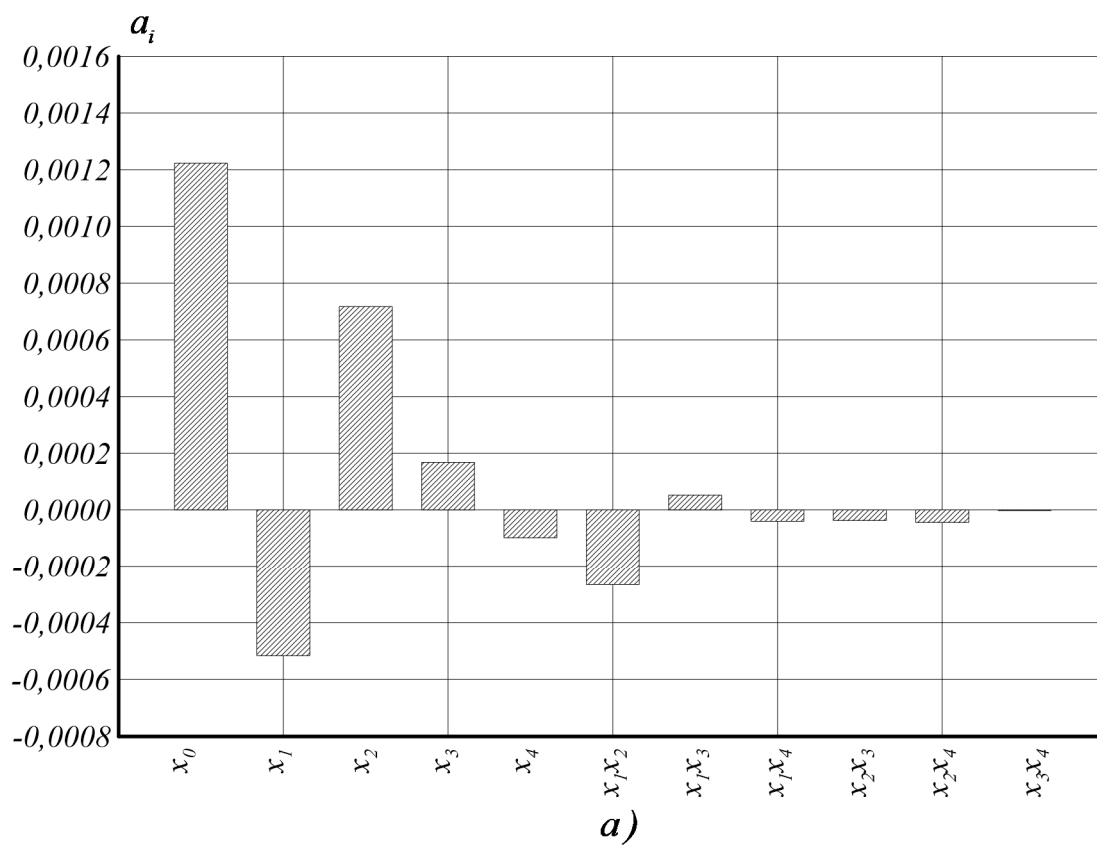


Рис. 2.20. Отримані значення коефіцієнтів моделей: а) моделі (2.39) факторного експерименту; б) моделі (2.40) факторного експерименту.

Таким чином, для мідно-цинкового сплаву (латуні) ЛС59-1 ДСТУ ГОСТ 2060:2007 отримано рівняння, що пов'язують між собою межу міцності на розрив σ_B , амплітуду відносної деформації (амплітуду пружної хвилі) ε_m , температуру T досліджуваного полікристалічного матеріалу, частоту f пружної хвилі, зміну $\Delta c/c$ фазової швидкості c пружної хвилі і зміну $\Delta K/K$ коефіцієнта поглинання K пружної хвилі.

Таким чином:

1. Між міцністю структурно-неоднорідних полікристалічних матеріалів, нелінійними параметрами рівнянь стану і параметрами пружної хвилі існує взаємозв'язок. Розповсюдження ультразвукової хвилі крізь структурно-неоднорідні полікристалічні матеріали можна описати, використовуючи феноменологічне рівняння стану з нелінійними функціями гістерезису тертя і гістерезису відриву.

2. Висунуто дві гіпотези: перша передбачає, що зміна фізико-механічних характеристик структурно-неоднорідних полікристалічних матеріалів, зокрема, межі міцності на розрив σ_B , впливає на зміну $\Delta c/c$ фазової швидкості c пружної хвилі і зміну $\Delta K/K$ коефіцієнта поглинання K пружної хвилі; друга передбачає, що на параметри $\Delta c/c$ і $\Delta K/K$, крім параметра σ_B , впливає також амплітуда ε_m пружної хвилі, температура T досліджуваного полікристалічного матеріалу і частота f пружної хвилі. Для забезпечення високої точності вимірювань доцільно зондувати полікристалічні матеріали ультразвуковою хвилею у вигляді пакетів пружних коливань із заданим співвідношенням амплітуд.

3. Зміна межі міцності на розрив σ_B структурно-неоднорідних полікристалічних матеріалів впливає на зміну параметра $\Delta c/c$ і зміну параметра $\Delta K/K$, проте ці зміни незначні і в більшості випадків не перевищують $(1...2)\%$.

4. Отримано аналітичні залежності між параметром σ_B і параметрами ε_m , T , f , $\Delta c/c$, $\Delta K/K$.

3. ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЮ НЕЛІНІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ХВИЛІ

3.1. Вимоги до технічних засобів ультразвукового контролю нелінійних параметрів ультразвукової хвилі

Як було показано вище, для перевірки першої і другої гіпотез необхідно провести експериментальні дослідження. Повний факторний експеримент щодо контролю міцності структурно-неоднорідних конструкційних полікристалічних матеріалів вимагає керування чотирма основними вхідними факторами: межею міцності на розрив σ_B , амплітудою відносної деформації (амплітудою пружної хвилі) ε_m , температурою T досліджуваного полікристалічного матеріалу і частотою f ультразвукової хвилі. А також потребує вимірювання зміни $\Delta c/c$ фазової швидкості c і вимірювання зміни $\Delta K/K$ коефіцієнта поглинання K .

Завдання керування чотирма основними вхідними факторами σ_B , ε_m , T і f в більшості випадків технічно досить легко вирішується. Однак, вимірювання $\Delta c/c$ і $\Delta K/K$ з високою точністю часто викликає труднощі.

По-перше, це пов'язано з тим, що зміна $\Delta c/c$ швидкості c і зміна $\Delta K/K$ коефіцієнта поглинання K дуже часто є незначною $\leq 0,01 \dots 0,02$, і лише в окремих випадках, при великій амплітуді пружної хвилі ε_m , якої досить важко досягти, є значною $\geq 0,05 \dots 0,10$.

По-друге, більшість експериментальних установок передбачає застосування електронних компонентів, які самі мають досить високий рівень нелінійних спотворень, на тлі яких виявити ультразвукову нелінійність досить складно.

В зв'язку з цим виникла необхідність в розробці і застосуванні таких засобів контролю нелінійних параметрів ультразвукової хвилі, які забезпечили б отримання параметрів $\Delta c/c$ і $\Delta K/K$ з необхідною роздільною здатністю на тлі як власної нелінійності електронних компонентів, так і негативного впливу шумів і завад.

Зважаючи на це, до розроблюваних засобів ультразвукового контролю нелінійних параметрів ультразвукової хвилі було висунуто такі вимоги.

По-перше, розроблювані засоби неруйнівного ультразвукового контролю з використанням нелінійних ефектів повинні забезпечувати часову стабільність вимірювальних схем, які реалізують такий контроль, в різних складних промислових умовах експлуатації.

По-друге, засоби ультразвукового контролю повинні мати стабільні метрологічні характеристики, можливість переналадження з одного класу полікристалічних матеріалів на інший, а також можливість зміни режимів контролю для одного і того ж класу полікристалічних матеріалів.

По-третє, засоби ультразвукового контролю повинні мати чіткий алгоритм функціонування, що дозволяє однозначно ідентифікувати вимірювані параметри ультразвукової хвилі.

По-четверте, засоби ультразвукового контролю повинні забезпечувати достатню швидкодію, необхідну для контролю полікристалічних матеріалів при швидкозмінних умовах експлуатації або при великій партії контрольованих виробів (наприклад, при експериментальному або дрібносерійному виробництві).

По-п'яте, засоби ультразвукового контролю повинні забезпечувати достатньо високий рівень автоматизації, що дає змогу інтегрувати вимірювальні схеми, які реалізують такий контроль, в різні системи керування технологічними процесами або виробництвами.

3.2. Технічні засоби вимірювання швидкості c ультразвукових хвиль в структурно-неоднорідному полікристалічному матеріалі

Як було показано вище, повний факторний експеримент щодо контролю міцності структурно-неоднорідних полікристалічних матеріалів вимагає вимірювання відносної зміни $\Delta c/c$ швидкості c , яка рідко перевищує $0,01 \dots 0,02$. Швидкість c в даному випадку визначає розповсюдження меншого з пакетів пружних коливань з амплітудою відносної деформації $\varepsilon_m = 10^{-8} \dots 10^{-7}$ – при такій амплітуді полікристалічні матеріали практично не виявляють своїх неліній-

них пружних властивостей. Тому для вирішення задачі вимірювання швидкості c ультразвукових хвиль з амплітудою відносної деформації $\varepsilon_m = 10^{-8} \dots 10^{-7}$ пропонується засіб вимірювання [52], структурну схему якого показано на рис. 3.1, а реалізація здійснюється таким чином.

Генератор електричних імпульсів 1 генерує з частотою $(0,1 \dots 1,0) \text{ кГц}$, яка залежить від геометричних розмірів полікристалічного матеріалу 12, імпульси високочастотних електричних коливань, які через змінний атенюатор 2 збуджують електроультразвуковий перетворювач 3 і одночасно потрапляють на вхід підсилювача високої частоти 4.

При цьому електричні імпульси генератора електричних імпульсів 1 безпосередньо впливають на блок часового автоматичного регулювання підсилення 5, який своєю напругою закриває підсилювач високої частоти 4 на заданий час.

Електроультразвуковий перетворювач 3 перетворює електричний зондувальний імпульс на ультразвуковий зондувальний імпульс, який через контактний шар 11 потрапляє в полікристалічний матеріал 12. При переході ультразвукового зондувального імпульсу в полікристалічний матеріал 12 виникає перший ультразвуковий імпульс, відбитий від зовнішньої поверхні полікристалічного матеріалу 12, який перетворюється електроультразвуковим перетворювачем 3 в електричний імпульс.

Тривалість запираючого імпульсу, що формується блоком часового автоматичного регулювання підсилення 5, обирається таким чином, щоб підсилювач високої частоти 4 був закритий на час дії ультразвукового зондувального імпульсу і першого ультразвукового імпульсу, відбитого від зовнішньої поверхні полікристалічного матеріалу 12.

Ультразвуковий зондувальний імпульс, потрапляючи в полікристалічний матеріал 12, проходить його у вигляді першого ультразвукового імпульсу, що пройшов зовнішню поверхню матеріалу, і відбивається від внутрішньої поверхні полікристалічного матеріалу 12.

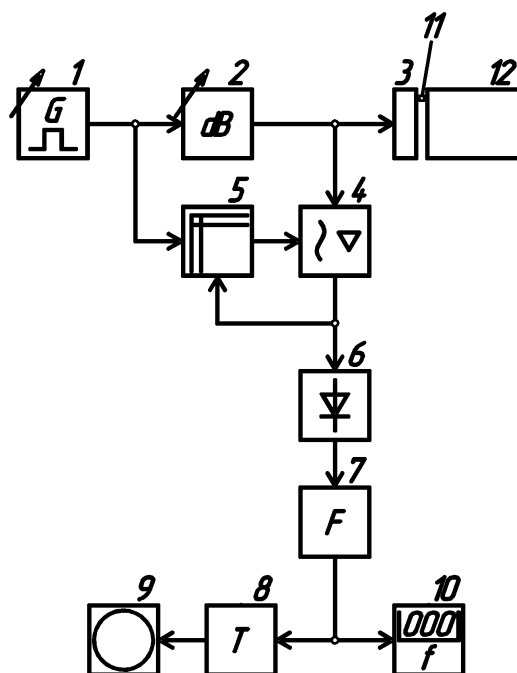


Рис. 3.1. Структурна схема засобу вимірювання швидкості c ультразвукових хвиль в структурно-неоднорідному полікристалічному матеріалі: 1 – генератор електричних імпульсів; 2 – змінний атенюатор; 3 – електроультразвуковий перетворювач; 4 – підсилювач високої частоти; 5 – блок часового автоматичного регулювання підсилення; 6 – амплітудний детектор; 7 – формувач коротких імпульсів; 8 – тригер з лічильним входом; 9 – вимірювач тривалості; 10 – цифровий частотомір; 11 – контактний шар; 12 – полікристалічний матеріал

Перший ультразвуковий імпульс, відбитий від внутрішньої поверхні полікристалічного матеріалу 12, проходить матеріал 12 в зворотному напрямку і досягає його зовнішньої поверхні. При цьому формуються другий ультразвуковий імпульс, що пройшов зовнішню поверхню матеріалу 12, і другий ультразвуковий імпульс, відбитий від зовнішньої поверхні матеріалу 12.

Другий ультразвуковий імпульс, що пройшов зовнішню поверхню полікристалічного матеріалу 12, перетворюється на електричний імпульс електроультразвуковим перетворювачем 3 і впливає на вхід підсилювача високої частоти 4, який на момент приходу другого ультразвукового імпульсу, що пройшов зовнішню поверхню матеріалу 12, вже є відкритим.

Другий ультразвуковий імпульс, відбитий від зовнішньої поверхні полікристалічного матеріалу 12, знову проходить матеріал 12, відбивається від внутрішньої поверхні полікристалічного матеріалу 12 як другий ультразвуковий імпульс, відбитий від внутрішньої поверхні матеріалу 12, ще раз проходить полі-

кристалічний матеріал 12 і надходить на електроультразвуковий перетворювач 3 як третій ультразвуковий імпульс, що пройшов зовнішню поверхню матеріалу 12. Третій ультразвуковий імпульс, що пройшов зовнішню поверхню матеріалу 12, також перетворюється на електричний імпульс електроультразвуковим перетворювачем 3 і надходить на вхід відкритого високочастотного підсилювача 4.

В результаті на виході високочастотного підсилювача 4 формується періодична послідовність імпульсів, що складається з другого ультразвукового імпульсу, який пройшов зовнішню поверхню полікристалічного матеріалу 12, і третього ультразвукового імпульсу, який пройшов зовнішню поверхню матеріалу 12. Електричні імпульси високої частоти детектуються амплітудним детектором 6. З отриманих електричних відеоімпульсів формувачем коротких імпульсів 7 формуються однополярні короткі імпульси, які впливають на лічильний вхід тригера з лічильним входом 8.

Поріг спрацювання формувача коротких імпульсів 7 встановлюється таким чином, щоб наступні ультразвукові імпульси, які відбиваються від зовнішньої і внутрішньої поверхонь полікристалічного матеріалу 12 і мають меншу амплітуду, пригнічувалися цим же формувачем коротких імпульсів 7. Короткі однополярні імпульси формувача коротких імпульсів 7 перемикають тригер з лічильним входом 8 з частотою надходження других ультразвукових імпульсів, що пройшли зовнішню поверхню матеріалу 12, і третіх ультразвукових імпульсів, що пройшли зовнішню поверхню матеріалу 12. На прямому і інверсному виходах тригера з лічильним входом 8 формуються протяжні прямокутні імпульси протилежної полярності.

Тривалість імпульсу однієї полярності визначається часовим інтервалом між моментом приходу другого ультразвукового імпульсу, що пройшов зовнішню поверхню матеріалу 12, і моментом приходу третього ультразвукового імпульсу, що пройшов зовнішню поверхню контрольованого матеріалу 12. Тривалість імпульсу іншої полярності – часовим інтервалом між моментом приходу третього ультразвукового імпульсу, що пройшов зовнішню поверхню мате-

ріалу 12, і моментом приходу наступного другого ультразвукового імпульсу, що пройшов зовнішню поверхню матеріалу 12. Вимірювач тривалості 9 реагує на різницю тривалостей інтервалів перемикавання, що дозволяє безпосередньо порівнювати ці тривалості. В разі періодичного надходження ультразвукових зондувальних імпульсів перший ультразвуковий імпульс, відбитий від зовнішньої поверхні полікристалічного матеріалу 12, з'явиться на вході підсилювача високої частоти 4 в момент часу

$$t_1 = t_0 + \tau, \quad (3.1)$$

де t_0 – час появи ультразвукового зондувального імпульсу на поверхні полікристалічного матеріалу 12; τ – затримка в електроультразвуковому перетворювачі 3, контактному шарі 11 і електричних ланках вимірювальної схеми.

В момент часу t_1 підсилювач високої частоти 4 заблоковано блоком часового автоматичного регулювання підсилення 5. Тому перший ультразвуковий імпульс, відбитий від зовнішньої поверхні матеріалу 12, буде виключено з послідовності прийнятих імпульсів. Другий ультразвуковий імпульс, що пройшов зовнішню поверхню матеріалу 12, з'явиться на вході підсилювача високої частоти 4 в момент часу

$$t_2 = t_1 + 2T = t_0 + \tau + 2T, \quad (3.2)$$

де T – час проходження ультразвуковими імпульсами відстані між зовнішньою і внутрішньою поверхнями полікристалічного матеріалу 12.

В момент часу t_2 підсилювач високої частоти 4 вже відкрито, тому підсилений електричний імпульс з'явиться на його виході. Третій ультразвуковий імпульс, що пройшов зовнішню поверхню матеріалу 12, з'явиться на вході підсилювача високої частоти 4 в момент часу (і також буде підсилено)

$$t_3 = t_2 + 2T = t_0 + \tau + 4T. \quad (3.3)$$

Наступні відбиті імпульси з меншими амплітудами з'являтимуться через часові інтервали, що є кратними $2T$. При впливі наступного ультразвукового зондувального імпульсу знову з'являться: наступний перший ультразвуковий імпульс, відбитий від зовнішньої поверхні матеріалу 12, другий ультразвуковий

імпульс, що пройшов зовнішню поверхню матеріалу 12, і третій ультразвуковий імпульс, що пройшов зовнішню поверхню матеріалу 12. Наступний перший ультразвуковий імпульс, відбитий від зовнішньої поверхні матеріалу 12, з'явиться у відповідь на електричний зондувальний імпульс у момент часу

$$t_4 = t_0 + \frac{1}{f}, \quad (3.4)$$

де f – початкова частота повторення ультразвукових зондувальних імпульсів.

Цей імпульс буде виключено блоком часового автоматичного регулювання підсилення 5, який активується наступним ультразвуковим зондувальним імпульсом. Наступний другий ультразвуковий імпульс, що пройшов крізь зовнішню поверхню полікристалічного матеріалу 12, з'явиться на вході вже відкритого підсилювача високої частоти 4 в момент часу (і буде підсилений)

$$t_5 = t_4 + 2T = t_0 + \frac{1}{f} + 2T. \quad (3.5)$$

Наступний третій ультразвуковий імпульс, що пройшов зовнішню поверхню матеріалу 12, також буде підсилено і з'явиться в момент часу

$$t_6 = t_5 + 2T = t_0 + \frac{1}{f} + 4T. \quad (3.6)$$

Таким чином, на тригер з лічильним входом 8 впливатимуть перемикальні імпульси в моменти часу t_2 і t_3 з інтервалом

$$\Delta\tau_1 = t_3 - t_2 = (t_0 + \tau + 4T) - (t_0 + \tau + 2T) = 2T, \quad (3.7)$$

і паузою

$$\Delta\tau_2 = \frac{1}{f} - \Delta\tau_1 = \frac{1}{f} - 2T. \quad (3.8)$$

Тобто на прямому і інверсному виходах тригера з лічильним входом 8 формуватимуться електричні різнополярні імпульси з тривалістю $\Delta\tau_1$ і $\Delta\tau_2$. Вимірювач тривалості 9 зафіксує нерівність середніх значень струмів двох імпульсів «зсувом покажчика» з нульової відмітки. Далі змінюють частоту проходження імпульсів генератора електричних імпульсів 1 до значення f^* , при якому вимірювач тривалості 9 встановиться на нульову позначку. При цьому

необхідно врахувати, що зі зменшенням інтервалів $\Delta\tau_1$ і $\Delta\tau_2$ третій ультразвуковий імпульс, що пройшов зовнішню поверхню матеріалу 12, в часі починає збігатися з наступним першим ультразвуковим імпульсом, відбитим від зовнішньої поверхні матеріалу 12.

В момент їх збігання ($\Delta\tau_1 = \Delta\tau_2$) підсилення третього ультразвукового імпульсу, що пройшов зовнішню поверхню полікристалічного матеріалу 12, підсилювачем високої частоти 4 припиняється, оскільки в цей момент він закритий блоком часового автоматичного регулювання підсилення 5.

В результаті на тригер з лічильним входом 8 починають впливати лише другі ультразвукові імпульси, що пройшли зовнішню поверхню матеріалу 12, які надходять із заданою частотою f^* слідування ультразвукових зондувальних імпульсів. За інших значень частоти f^{**} слідування ультразвукових зондувальних імпульсів, коли $f^{**} > f^*$ або $f^{**} < f^*$, на тригер з лічильним входом 8 надходить нерівномірна послідовність імпульсів, що складається як із других ультразвукових імпульсів, які пройшли зовнішню поверхню матеріалу 12, так і з третіх ультразвукових імпульсів, що пройшли зовнішню поверхню матеріалу 12, з нерівними інтервалами ($\Delta\tau_1 \neq \Delta\tau_2$).

Показання U_9 вимірювача тривалості 9 встановлюється пропорційними різниці порівнюваних інтервалів $\Delta\tau_1$ і $\Delta\tau_2$:

$$U_9 = S_9 (\Delta\tau_1 - \Delta\tau_2), \quad (3.9)$$

де S_9 – крутизна перетворення інтервалів часу в електричну напругу вимірювача тривалості 9.

В разі рівності порівнюваних інтервалів $\Delta\tau_1$ і $\Delta\tau_2$ ($U_9 = 0$) з урахуванням (3.7) і (3.8) маємо:

$$t_3 - t_2 = \frac{1}{f^*} - 2T, \quad (3.10)$$

де f^* – частота проходження ультразвукових зондувальних імпульсів, встановлена при нульовому показі вимірювача тривалості 9.

Підставляючи у формулу (3.10) значення t_2 з формули (3.2) і значення t_3 з формули (3.3), отримаємо:

$$\frac{I}{f^*} = (t_0 + \tau + 4T) - (t_0 + \tau + 2T) + 2T = 4T. \quad (3.11)$$

З формули (3.11) видно, що частота ультразвукових зондувальних імпульсів, які генерує генератор електричних імпульсів 1, встановлюється кратною часу проходження ультразвукових імпульсів крізь полікристалічний матеріал 12:

$$f^* = \frac{I}{4T}. \quad (3.12)$$

Частота надходження других ультразвукових імпульсів, що пройшли зовнішню поверхню матеріалу 12, збігається з частотою надходження ультразвукових зондувальних імпульсів. Тому час проходження ультразвукових зондувальних імпульсів крізь полікристалічний матеріал 12 можна визначити за формулою

$$T = \frac{I}{4f_0}, \quad (3.13)$$

де f_0 – частота надходження других ультразвукових імпульсів 12, які пройшли зовнішню поверхню матеріалу.

Частоту надходження f_0 других ультразвукових імпульсів 12, які пройшли зовнішню поверхню полікристалічного матеріалу, вимірюють цифровим частотоміром 10, на який надходять однополярні короткі імпульси, які формує формувач коротких імпульсів 7.

Вплив всіх наступних відбитих імпульсів пригнічується, оскільки вони впливають на високочастотний підсилювач 4 в ті моменти часу, коли він заблокований блоком часового автоматичного регулювання підсилення 5, через збіг в часі третіх ультразвукових імпульсів 12, які пройшли зовнішню поверхню контрольованого матеріалу, з наступними першими ультразвуковими імпульсами, відбитими від зовнішньої поверхні матеріалу 12.

Отже, за виміряними значеннями частоти f_0 можна визначити час прохо-

дження ультразвукових імпульсів через структурно-неоднорідний полікристалічний матеріал 12 незалежно від наявності затримок в електроультразвуковому перетворювачі 3, контактному шарі 11 і електричних ланцюгах вимірювальної схеми. Оскільки перемикальні імпульси формуються лише з відбитих імпульсів, то зменшується вплив спотворень їхньої форми на результати вимірювань.

Відповідно до наведеної вище формули (3.13), якщо довжина полікристалічного матеріалу 12 становить L , то швидкість c проходження ультразвукових імпульсів крізь нього становить

$$c = \frac{L}{T} = 4f_0L. \quad (3.14)$$

Як було показано вище, засоби вимірювання швидкості c ультразвукових хвиль в структурно-неоднорідному полікристалічному матеріалі 12 доцільно застосовувати тоді, коли ультразвукова хвиля має амплітуду відносної деформації $\varepsilon_m = 10^{-8} \dots 10^{-7}$.

Як видно з формули (3.14), швидкість c ультразвукової хвилі можна визначити, знаючи частоту f_0 генератора електричних імпульсів 1 і довжину L полікристалічного матеріалу 12. При цьому частоту f_0 генератора електричних імпульсів 1 можна контролювати з відносною похибкою не гірше ніж 10^{-4} використовуючи, наприклад, джерела сигналів з кварцовою стабілізацією частоти згідно з ГОСТ 21712-76 “Резонатори кварцові. Основні параметри”, які мають приведену похибку $10^{-5} \dots 10^{-4}$.

Довжину L полікристалічного матеріалу 12 також можна контролювати з абсолютною похибкою $\pm(0,05 \dots 0,10)$ мм, використовуючи, наприклад, штангенциркулі з цифровим відліковим пристроєм згідно з ГОСТ 166-89 “Штангенциркулі. Технічні умови”. Таким чином, наведений вище засіб вимірювання швидкості c пружних хвиль в структурно-неоднорідному полікристалічному матеріалі можна рекомендувати для точного визначення швидкості пружних хвиль невеликої інтенсивності.

3.3. Технічні засоби вимірювання абсолютної зміни Δc швидкості c ультразвукових хвиль в структурно-неоднорідному полікристалічному матеріалі

Для розв'язання задачі вимірювання абсолютної зміни Δc швидкості c пружних хвиль з амплітудою відносної деформації $\varepsilon_m = 10^{-6} \dots 10^{-5}$ пропонується засіб вимірювання [43], структурну схему якого показано на рис. 3.2, а реалізація здійснюється таким чином. Генератор електричних коливань 1 створює електричні коливання.

$$U_1(t) = U_{m1} \cos(2\pi f_1 t + \varphi_1), \quad (3.15)$$

де U_{m1} – амплітуда електричних коливань генератора електричних коливань 1; f_1 – частота електричних коливань генератора електричних коливань 1; φ_1 – початкова фаза електричних коливань генератора електричних коливань 1; t – час.

Початковою фазою φ_1 електричних коливань генератора електричних коливань 1 можна знехтувати і вважати, що

$$\varphi_1 = 0. \quad (3.16)$$

Частоту f_1 обирають в області першого послідовного резонансу електро-ультразвукового випромінювача 7 з метою отримання максимальної ефективності перетворення електричних коливань на ультразвукові. За допомогою трансформатора 2 досягають зміни амплітуди вихідних електричних коливань $U_2(t)$ в широкому діапазоні внаслідок масштабного перетворення:

$$U_2(t) = k_2 U_{m1} \cos(2\pi f_1 t - \varphi_2), \quad (3.17)$$

де k_2 – коефіцієнт масштабного перетворення трансформатора 2; φ_2 – початкова фаза вихідних електричних коливань.

Амплітуду вихідних електричних коливань $U_2(t)$ встановлюють мінімальною, але достатньою для збудження слабких ультразвукових коливань. Масштабовані електричні коливання (3.17) розділяють на зондувальні і опорні. За

допомогою автоматичного перемикача 5 формують пакети електричних зондувальних коливань.

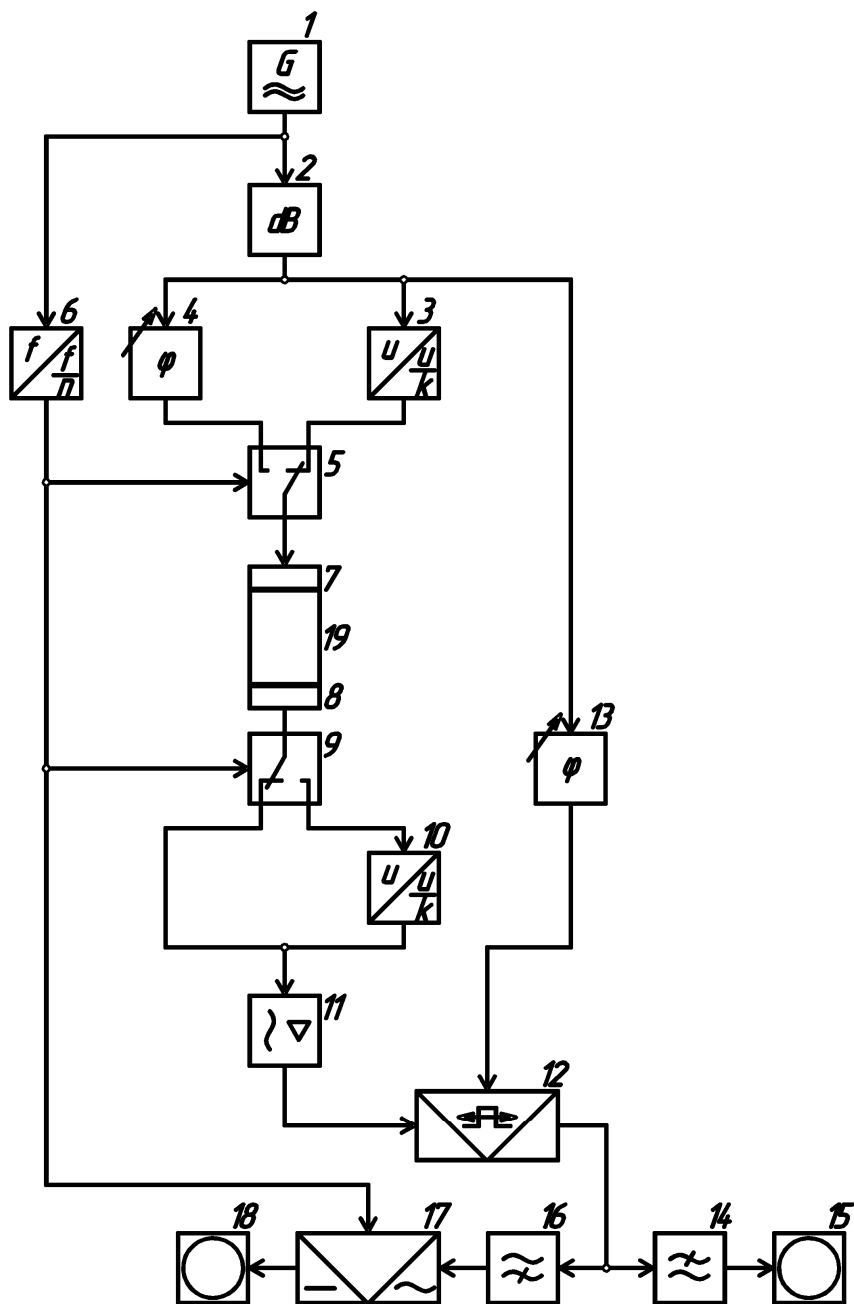


Рис. 3.2. Структурна схема засобу вимірювання абсолютної зміни Δc швидкості c ультразвукової хвилі в структурно-неоднорідному полікристалічному матеріалі:
 1 – генератор електричних коливань; 2 – трансформатор; 3 – дільник напруги;
 4 – градуйований фазообертач; 5 – автоматичний перемикач; 6 – дільник частоти;
 7 – електроультразвуковий випромінювач; 8 – електроультразвуковий приймач;
 9 – автоматичний перемикач; 10 – дільник напруги; 11 – попередній підсилювач;
 12 – фазовий детектор; 13 – градуйований фазообертач; 14 – фільтр нижніх частот;
 15 – індикатор; 16 – фільтр верхніх частот; 17 – фазочутливий випрямляч; 18 – індикатор;
 19 – полікристалічний матеріал

Розглянемо спочатку проходження пакета електричних зондувальних ко-

ливань зі зменшеною амплітудою. Електричні зондувальні коливання зі зменшеною амплітудою мають вигляд

$$U_7'(t) = k_3 k_2 U_{m1} \cos(2\pi f_1 t - \varphi_2), \quad (3.18)$$

де k_3 – коефіцієнт масштабного перетворення дільника напруги 3.

Перетворюють електричні зондувальні коливання $U_7'(t)$ в ультразвукові за допомогою електроультразвукового випромінювача 7:

$$\varepsilon_7'(t) = S_7 k_3 k_2 U_{m1} \cos(2\pi f_1 t - \varphi_2), \quad (3.19)$$

де S_7 – крутизна перетворення електричних коливань на ультразвукові в електроультразвуковому випромінювачі 7.

Випромінюють ультразвукові коливання в полікристалічний матеріал 19. При цьому ультразвукові зондувальні коливання, які пройшли через матеріал 19 довжиною L , запізнюються, що призводить до їх додаткового фазового зсуву. Якщо довжина полікристалічного матеріалу 19 дорівнює L , а швидкість розповсюдження ультразвукових коливань при амплітуді $S_7 k_3 k_2 U_{m1}$ дорівнює c , то ультразвукові коливання, що пройшли матеріал 19, мають вигляд:

$$\varepsilon_8'(t) = k_{19}' S_7 k_3 k_2 U_{m1} \cos\left(2\pi f_1 t - \varphi_2 - 2\pi f_1 \frac{L}{c}\right), \quad (3.20)$$

де k_{19}' – коефіцієнт поглинання полікристалічного матеріалу 19 при амплітуді випромінюваних ультразвукових коливань $S_7 k_3 k_2 U_{m1}$.

Прийняті ультразвукові зондувальні коливання перетворюються на прийняті електричні зондувальні коливання за допомогою електроультразвукового приймача 8:

$$U_8'(t) = S_8 k_{19}' S_7 k_3 k_2 U_{m1} \cos\left(2\pi f_1 t - \varphi_2 - 2\pi f_1 \frac{L}{c}\right), \quad (3.21)$$

де S_8 – крутизна перетворення ультразвукових коливань в електричні в електроакустичному приймачі 8.

Опорні електричні коливання $U_{13}(t)$ додатково зсувають на кут 90° ($\pi/2$), внаслідок чого вони мають вигляд

$$U_{13}(t) = k_2 U_{m1} \cos\left(2\pi f_1 t - \varphi_2 - \frac{\pi}{2} - \varphi_{13}\right), \quad (3.22)$$

де φ_{13} – показання градуйованого фазообертача 13.

Електричні опорні коливання (3.22) порівнюють за фазою з прийнятими електричними зондувальними коливаннями (3.21). Порівняння здійснюють перемножуванням порівнюваних коливань в фазовому детекторі 12. Постійна складова, що утворюється в результаті перемножування коливань однакової частоти $2\pi f_1$, має вигляд:

$$U_{12}'(t) = S_{12} S_{11} S_8 k_{19}' S_7 k_3 k_2^2 U_{m1}^2 \cos\left(\frac{\pi}{2} + \varphi_{13} - 2\pi f_1 \frac{L}{c}\right), \quad (3.23)$$

де S_{11} – коефіцієнт підсилення попереднього підсилювача 11; S_{12} – коефіцієнт масштабного перетворення фазового детектора 12.

Далі фазообертачем 13 змінюють фазу φ_{13} електричних опорних коливань (3.22) до отримання нульового значення постійної складової напруги (3.23), що досягається за умови

$$\cos\left(\frac{\pi}{2} + \varphi_{13} - 2\pi f_1 \frac{L}{c}\right) = 0. \quad (3.24)$$

З рівняння (3.24) випливає, що

$$2\pi f_1 \frac{L}{c} = \varphi_{13}. \quad (3.25)$$

Звідки отримуємо швидкість розповсюдження ультразвукових коливань

$$c = 2\pi f_1 \frac{L}{\varphi_{13}}. \quad (3.26)$$

Швидкість c із співвідношення (3.26) відповідає розповсюдженню слабких ультразвукових коливань з $\varepsilon_m = 10^{-8} \dots 10^{-7}$. Для виявлення нелінійності полікристалічного матеріалу електричні зондувальні коливання 19, що збуджують ультразвукові коливання, періодично за допомогою автоматичного перемикача 5 подаються на електроультразвуковий випромінювач 7 через фазообертач 4, тобто без їх послаблення в k_3 рази. Одночасно прийняті електричні зондувальні

коливання періодично зменшують в ту ж саму кількість разів $k_{10} = k_3$. При цьому зміну амплітуд випромінюваних і прийнятих електричних зондувальних коливань здійснюють синхронно, але в протифазі. Завдяки цьому амплітуда прийнятих електричних зондувальних коливань, що порівнюються з електричними опорними коливаннями, залишається практично постійною. Водночас амплітуда ультразвукових зондувальних коливань стрибкоподібно змінюється в k_3 рази.

Тепер розглянемо проходження пакета електричних зондувальних коливань з незменшеною амплітудою. Електричні зондувальні коливання з незменшеною амплітудою мають наступний вигляд

$$U_7''(t) = k_2 U_{m1} \cos(2\pi f_1 t - \varphi_2 - \varphi_4), \quad (3.27)$$

де φ_4 – показання градуйованого фазообертача 4.

Далі електричні зондувальні коливання перетворюються на ультразвукові за допомогою електроультразвукового випромінювача 7:

$$\varepsilon_7''(t) = S_7 k_2 U_{m1} \cos(2\pi f_1 t - \varphi_2 - \varphi_4). \quad (3.28)$$

В момент проходження ультразвукових коливань через полікристалічний матеріал 19 з незменшеною амплітудою, внаслідок зміни швидкості розповсюдження, змінюється їх фазовий зсув. Ультразвукові коливання, що пройшли крізь контрольований матеріал 19, мають вигляд:

$$\varepsilon_8''(t) = k_{19}'' S_7 k_2 U_{m1} \cos\left(2\pi f_1 t - \varphi_2 - \varphi_4 - 2\pi f_1 \frac{L}{c + \Delta c}\right), \quad (3.29)$$

де k_{19}'' – коефіцієнт поглинання полікристалічного матеріалу 19 при амплітуді випромінюваних ультразвукових коливань $S_7 k_2 U_{m1}$; Δc – абсолютна зміна швидкості c розповсюдження ультразвукових коливань.

Прийняті ультразвукові зондувальні коливання знову перетворюються на прийняті електричні зондувальні коливання:

$$U_8''(t) = k_{10} S_8 k_{19}'' S_7 k_2 U_{m1} \cos\left(2\pi f_1 t - \varphi_2 - \varphi_4 - 2\pi f_1 \frac{L}{c + \Delta c}\right), \quad (3.30)$$

де k_{10} – коефіцієнт масштабного перетворення дільника напруги 10.

Електричні опорні коливання (3.22) порівнюються за фазою з прийнятими електричними зондувальними коливаннями (3.30). Постійна складова, яка утворюється в результаті перемножування коливань, має вигляд:

$$U_{12}''(t) = S_{12} S_{11} S_8 k_{19}'' S_7 k_3 k_2^2 U_{m1}^2 \cos\left(\frac{\pi}{2} + \varphi_{13} - \varphi_4 - 2\pi f_1 \frac{L}{c + \Delta c}\right). \quad (3.31)$$

В формулі (3.31) замість k_3 можна використовувати k_{10} , оскільки вони рівні між собою. Далі змінюють градуйованим фазообертачем фазу φ_4 електричних зондувальних коливань (3.27) з незменшеною амплітудою до отримання нульового значення змінної складової напруги (3.31), що досягається за умови:

$$\begin{aligned} \cos\left(\frac{\pi}{2} + \varphi_{13} - \varphi_4 - 2\pi f_1 \frac{L}{c + \Delta c}\right) &= \cos\left(\frac{\pi}{2} + 2\pi f_1 \frac{L}{c} - \varphi_4 - 2\pi f_1 \frac{L}{c + \Delta c}\right) = \\ &= \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_4 + 2\pi f_1 L \frac{\Delta c}{c(c + \Delta c)}\right) = 0. \end{aligned} \quad (3.32)$$

Нехтуючи величиною Δc в знаменнику отриманого виразу (3.32), оскільки ($\Delta c \ll c$), отримуємо:

$$2\pi f_1 L \frac{\Delta c}{c^2} = \varphi_4. \quad (3.33)$$

З виразу (3.33) визначаємо абсолютну зміну Δc швидкості c розповсюдження ультразвукових коливань в полікристалічному матеріалі 19:

$$\Delta c = c^2 \frac{\varphi_4}{2\pi f_1 L}. \quad (3.34)$$

Вираз (3.34) з урахуванням (3.26) набуває остаточного вигляду:

$$\Delta c = 2\pi f_1 L \frac{\varphi_4}{\varphi_{13}^2}. \quad (3.35)$$

Отже, за величинами уведених фазових зсувів φ_4 і φ_{13} відповідно в колах електричних зондувальних і опорних коливань можна визначити абсолютну зміну Δc швидкості c розповсюдження ультразвукових коливань в полікриста-

лічному матеріалі 19. Щоб уникнути неоднозначності вимірювань, яка пояснюється циклічністю зміни фази на 2π (360°), необхідне виконання умови:

$$2\pi f_1 L \leq 2\pi \frac{c^2}{\Delta c_{\max}}, \quad (3.36)$$

де $\Delta c_{\max}$ – максимальна абсолютна зміна швидкості c розповсюдження ультразвукових коливань в полікристалічному матеріалі 19.

З огляду на співвідношення (3.36) обирають довжину L полікристалічного матеріалу 19:

$$L \leq \frac{c^2}{f_1 \Delta c_{\max}}. \quad (3.37)$$

Як було показано вище, засоби вимірювання абсолютної зміни Δc швидкості c пружних хвиль в структурно-неоднорідному полікристалічному матеріалі 19 доцільно застосовувати тоді, коли пружна хвиля має амплітуду відносної деформації $\varepsilon_m = 10^{-6} \dots 10^{-5}$. Як видно з формули (3.35), абсолютну зміну Δc швидкості c пружної хвилі можна визначити, знаючи частоту f_1 генератора електричних коливань 1 і довжину L полікристалічного матеріалу 19 та фазові зсуви φ_4 і φ_{13} градуйованих фазообертачів 13 і 4. При цьому частоту f_1 генератора електричних коливань 1 можна контролювати з відносною похибкою не гіршою, ніж 10^{-4} , використовуючи, наприклад, джерела сигналів із кварцовою стабілізацією частоти, а довжину L полікристалічного матеріалу 19 можна контролювати з абсолютною похибкою $\pm(0,01 \dots 0,02)$ мм, використовуючи, наприклад, штангенциркулі з цифровим відліковим пристроєм. Фазові зсуви φ_4 і φ_{13} на частотах до $(100 \dots 200)$ кГц можна контролювати з похибкою не гіршою, ніж $(0,10 \dots 0,05)^\circ$, використовуючи, наприклад, еталонні фазообертачі.

Необхідно зазначити, що для визначення відносної зміни $\Delta c/c$ швидкості c необхідно спочатку визначити Δc за формулою (3.35), потім визначити c за формулою (3.14), після чого розрахувати необхідне співвідношення $\Delta c/c$ шляхом ділення значення з формули (3.35) на значення з формули (3.14).

3.4. Технічні засоби вимірювання відносної зміни $\Delta c/c$ швидкості c ультразвукових хвиль в структурно-неоднорідному полікристалічному матеріалі

Для вирішення задачі вимірювання відносної зміни $\Delta c/c$ швидкості c пружних хвиль з амплітудою відносної деформації $\varepsilon_m = 10^{-6} \dots 10^{-5}$ пропонується засіб вимірювання [50], структурну схему якого показано на рис. 3.3, а реалізація здійснюється наступним чином. Спочатку створюють електричні зондувальні коливання $U_1(t)$ за допомогою генератора зондувальних коливань 1:

$$U_1(t) = U_{m1} \cos(2\pi f_1 t + \varphi_1), \quad (3.38)$$

де U_{m1} – амплітуда електричних коливань генератора зондувальних коливань 1; f_1 – частота електричних коливань генератора зондувальних коливань 1; φ_1 – початкова фаза електричних коливань генератора зондувальних коливань 1; t – час.

Крім цього, створюються електричні опорні коливання $U_{13}(t)$ за допомогою генератора опорних коливань 13:

$$U_{13}(t) = U_{m13} \cos(2\pi f_{13} t + \varphi_{13}), \quad (3.39)$$

де U_{m13} – амплітуда електричних коливань генератора опорних коливань 13; f_{13} – частота електричних коливань генератора опорних коливань 13; φ_{13} – початкова фаза електричних коливань генератора опорних коливань 13.

Потім, в початковому положенні автоматичного перемикача 4, електричні опорні коливання $U_{13}(t)$, що мають постійну амплітуду, перетворюються за допомогою електроультразвукового випромінювача 5 на ультразвукові опорні коливання, які проходять через полікристалічний матеріал 22 і приймаються електроультразвуковим приймачем 6. Прийняті ультразвукові опорні коливання перетворюються знову на прийняті електричні опорні коливання

$$U_6(t) = k_{22} U_{m13} \cos(2\pi f_{13} t + \varphi_{13} + \Delta\varphi_{13}), \quad (3.40)$$

де $\Delta\varphi_{13}$ – додатковий фазовий зсув ультразвукових опорних коливань, що вно-

ситься полікристалічним матеріалом 22 на частоті f_{13} ; k_{22} – коефіцієнт поглинання ультразвукових опорних коливань.

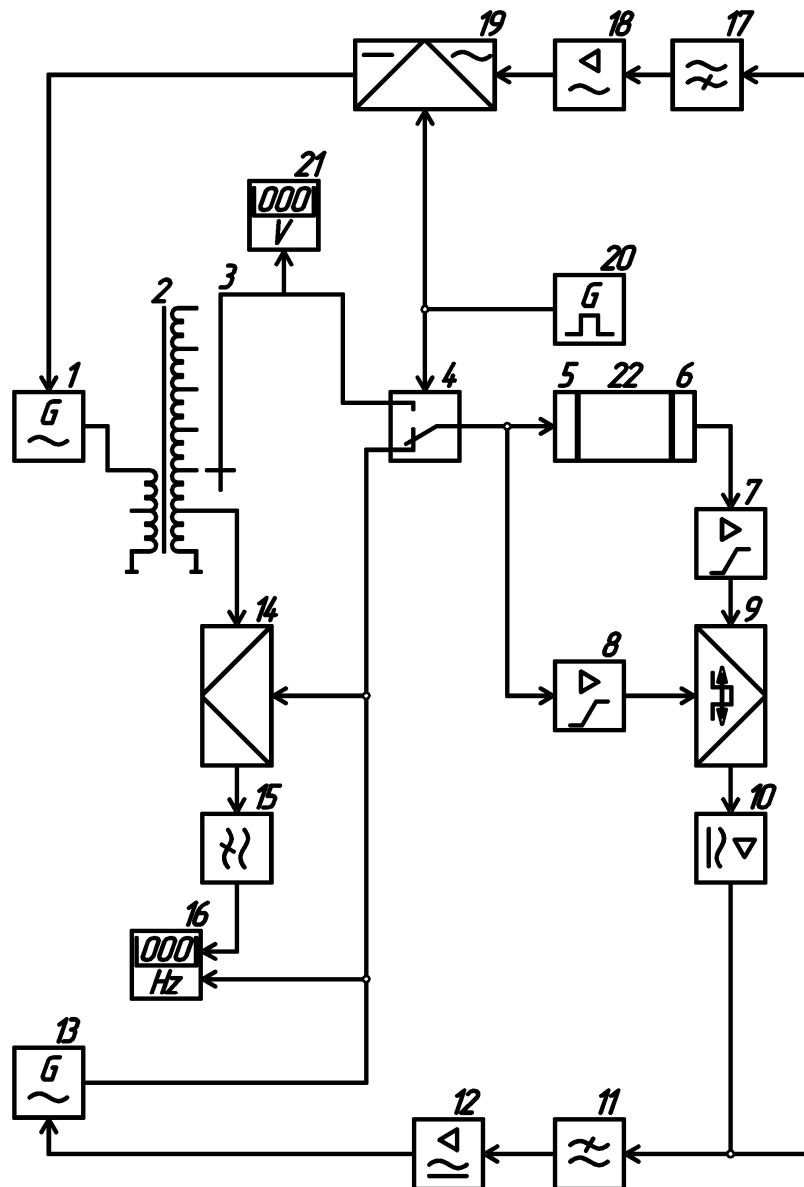


Рис. 3.3. Структурна схема засобу вимірювання відносної зміни $\Delta c/c$ швидкості розповсюдження c ультразвукової хвилі в структурно-неоднорідному полікристалічному матеріалі: 1 – генератор зондувальних коливань; 2 – трансформатор; 3 – комутатор; 4 – автоматичний перемикач; 5 – електроультразвуковий випромінювач; 6 – електроультразвуковий приймач; 7 – підсилювач-обмежувач; 8 – підсилювач-обмежувач; 9 – фазовий детектор; 10 – широкосмуговий підсилювач; 11 – фільтр нижніх частот; 12 – підсилювач постійної напруги; 13 – генератор опорних коливань; 14 – балансний змішувач; 15 – фільтр нижніх частот; 16 – цифровий частотомір; 17 – фільтр верхніх частот; 18 – підсилювач змінної напруги; 19 – фазочутливий випрямляч; 20 – мультивібратор; 21 – цифровий вольтметр; 22 – полікристалічний матеріал

Прийняті електричні опорні коливання $U_0(t)$ підсилюються і обмежуються за амплітудою підсилювачем-обмежувачем 7, після чого вони надходять

на перший вхід фазового детектора 9. Одночасно електричні опорні коливання $U_{13}(t)$ безпосередньо через підсилювач-обмежувач 8 надходять на другий вхід фазового детектора 9. Додатковий фазовий зсув, внесений полікристалічним матеріалом 22, буде пропорційним його довжині L :

$$\Delta\varphi_{13} = 2\pi f_{13} \frac{L}{c}, \quad (3.41)$$

де c – швидкість розповсюдження ультразвукових коливань при їхній невеликій амплітуді.

Вихідна напруга фазового детектора 9, пропорційна фазовому зсуву $\Delta\varphi_{13}$, підсилюється широкосмуговим підсилювачем 10. Після цього з нього виділяють постійну складову напруги фільтром нижніх частот 11, яка підсилюється підсилювачем постійної напруги 12. Постійна складова впливає на керуючий вхід генератора опорних коливань 13 і змінює його частоту f_{13} до отримання фазового зсуву, що є кратним 2π :

$$\Delta\varphi_{13}' = 2\pi f_{13}' \frac{L}{c} = 2\pi n, \quad (3.42)$$

де $\Delta\varphi_{13}'$ – додатковий фазовий зсув, який вносить полікристалічний матеріал 22 на частоті f_{13}' ; f_{13}' – змінювана частота генератора опорних коливань 13; n – ціле число.

Після цього автоматичний перемикач 4 переводять в положення, протилежне показаному на рис. 3.3, і на електроультразвуковий випромінювач 5 надходять електричні зондувальні коливання $U_1(t)$, що мають змінну амплітуду і частоту f_1 , яка близька до частоти f_{13} . Фазовий зсув, який вносить полікристалічний матеріал 22 на частоті f_1 , визначається виразом:

$$\Delta\varphi_1 = 2\pi f_1 \frac{L}{c}. \quad (3.43)$$

Якщо частота f_1 не дорівнює частоті f_{13}' , то вихідна напруга на виході фазового детектора 9 зміниться. При періодичних перемиканнях електричних

коливань $U_1(t)$ і $U_{13}(t)$ автоматичним перемикачем 4 на його виході формуються пакети, які складаються з цих коливань, а на виході фазового детектора 9 з'явиться змінна складова напруги, частота якої дорівнює частоті перемикання пакетів електричних коливань. Змінну складову виділяють фільтром верхніх частот 17, підсилюють підсилювачем змінної напруги 18 і випрямляють фазочутливим випрямлячем 19. Випрямлена напруга впливає на керуючий вхід генератора зондувальних коливань 1 і змінює його частоту f_1 до значення f_1' , коли досягається рівність частот:

$$f_1' = f_{13}', \quad (3.44)$$

де f_1' – змінена частота генератора зондувальних коливань 1.

За допомогою трансформатора 2 і комутатора 3 збільшують амплітуду електричних зондувальних коливань $U_1(t)$. При цьому в полікристалічному матеріалі 22, при збільшенні амплітуди ультразвукових коливань, їх швидкість c змінюється. Додатковий фазовий зсув, що вноситься полікристалічним матеріалом 22 на частоті f_1' , набуває вигляду:

$$\Delta\varphi_1' = 2\pi f_1' \frac{L}{c + \Delta c}, \quad (3.45)$$

де Δc – абсолютна зміна швидкості c ультразвукових зондувальних коливань.

За умови нерівності фазових зсувів, що вносяться полікристалічним матеріалом 22 в коливання різної амплітуди ($\Delta\varphi_1 \neq \Delta\varphi_1'$), знову виникає змінна складова напруги на виході фазового детектора 9. Ця змінна складова після підсилення і випрямлення відповідно змінює частоту f_1' генератора зондувальних коливань 1 до значення f_1'' , коли досягається фазовий зсув, що є кратним 2π :

$$\Delta\varphi_1'' = 2\pi f_1'' \frac{L}{c + \Delta c} = 2\pi n, \quad (3.46)$$

де $\Delta\varphi_1''$ – додатковий фазовий зсув, який вносить полікристалічний матеріал 22 на частоті f_1'' ; f_1'' – змінена частота генератора зондувальних коливань 1.

Прирівнюючи між собою вирази (3.42) і (3.46), отримаємо:

$$\frac{2\pi f_{13}'}{c} = \frac{2\pi f_1''}{c + \Delta c}. \quad (3.47)$$

Розв'язавши рівняння (3.47) відносно відносної зміни $\Delta c/c$ швидкості c розповсюдження ультразвукових коливань, отримаємо:

$$\frac{\Delta c}{c} = \frac{2\pi f_1'' - 2\pi f_{13}'}{2\pi f_{13}'} \quad (3.48)$$

Електричні коливання $U_1(t)$ і $U_{13}(t)$ додатково змішують в балансовому змішувачі 14. Після цього з них фільтром нижніх частот 15 виділяють різницеві коливання з частотою $2\pi f_1'' - 2\pi f_{13}'$. На перший вхід цифрового частотоміра 16 надходять різницеві коливання з частотою $2\pi f_1'' - 2\pi f_{13}'$, а на його другий вхід – коливання $U_2(t)$ з частотою $2\pi f_{13}'$. В режимі вимірювання відношення частот цифровий частотомір 16 показуватиме значення

$$\frac{2\pi f_1'' - 2\pi f_{13}'}{2\pi f_{13}'} \quad (3.49)$$

Як видно з формули (3.48), відносну зміну $\Delta c/c$ швидкості c ультразвукової хвилі можна визначити, знаючи частоти f_1'' і f_{13}' відповідно генератора зондувальних коливань 1 і генератора опорних коливань 13.

Частоти f_1'' і f_{13}' відповідно генератора зондувальних коливань 1 і генератора опорних коливань 13 можна контролювати з відносною похибкою не гіршою ніж 10^{-4} , використовуючи, наприклад, джерела сигналів із кварцовою стабілізацією частоти. Крім того, відпадає необхідність контролю довжини L полікристалічного матеріалу 22 за допомогою різних мікрометричних інструментів, а також контролю додаткових фазових зсувів, що вносяться полікристалічним матеріалом 22 на різних частотах.

3.5. Технічні засоби вимірювання відносної зміни $\Delta K/K$ коефіцієнта поглинання K ультразвукових хвиль в структурно-неоднорідному полікристалічному матеріалі

Для вирішення поставленого завдання вимірювання відносної зміни $\Delta K/K$ коефіцієнта поглинання K ультразвукових хвиль в структурно-неоднорідному полікристалічному матеріалі пропонується засіб вимірювання [46], структурну схему якого показано на рис. 3.4, а реалізація здійснюється таким чином. Обирають частоту електричних коливань генератора електричних коливань 1 в області послідовного резонансу електроультра звукових перетворювачів 19 і 20, призначених для випромінювання ультразвукових коливань в полікристалічний матеріал 6 і приймання ультразвукових коливань із полікристалічного матеріалу 6.

Спочатку контакт регульованого дільника напруги 2 встановлюють в нижнє положення, що відповідає мінімальному значенню амплітуди електричних коливань. Електричні коливання з контакту регульованого дільника напруги 2 проходять через дільник напруги 3 і, за вказаного положення автоматичного перемикача 4, збуджують в полікристалічному матеріалі 6 ультразвукові коливання з амплітудою ε_1 :

$$\varepsilon_1 = U_{m1}' S_1 = U_m k_2 k_3 S_1, \quad (3.50)$$

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

Ультразвукові коливання, що пройшли через полікристалічний матеріал 6, знову перетворюються на електричні коливання, які, за вказаного положення автоматичного перемикача 8, надходять на вхід підсилювача з регульованим

коефіцієнтом підсилення 9. Амплітуда прийнятих електричних коливань U_{m1}'' :

$$U_{m1}'' = k_6 S_2 \varepsilon_1 = U_m k_2 k_3 S_1 k_6 S_2, \quad (3.51)$$

де k_6 – коефіцієнт поглинання полікристалічного матеріалу 6 за амплітуди ультразвукових коливань ε_1 ; S_2 – крутизна перетворення ультразвукових коливань в електричні.

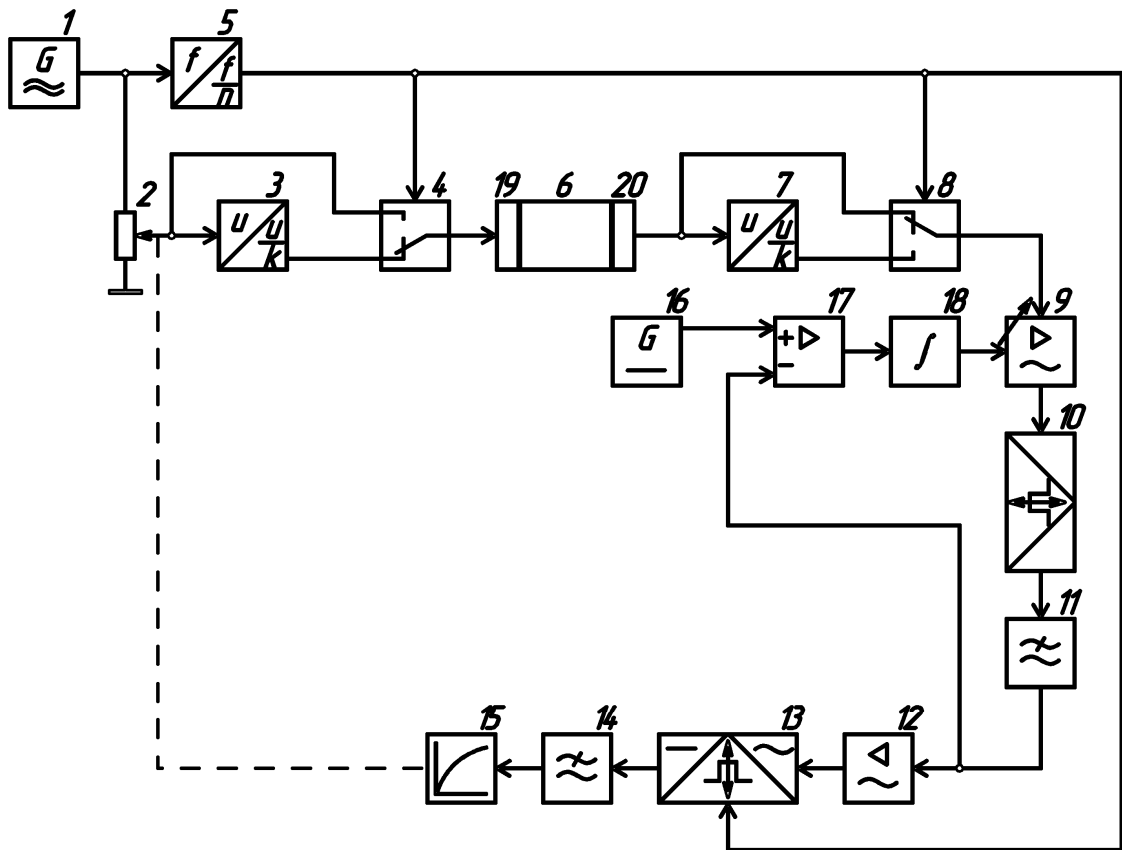


Рис. 3.4. Структурна схема засобу вимірювання відносної зміни $\Delta K/K$ коефіцієнта поглинання K ультразвукової хвилі в структурно-неоднорідному полікристалічному матеріалі: 1 – генератор електричних коливань; 2 – регульований дільник напруги; 3 – дільник напруги; 4 – автоматичний перемикач; 5 – дільник частоти; 6 – полікристалічний матеріал; 7 – дільник напруги; 8 – автоматичний перемикач; 9 – підсилювач з регульованим коефіцієнтом підсилення; 10 – амплітудний детектор; 11 – фільтр нижніх частот; 12 – підсилювач змінної напруги; 13 – фазочутливий випрямляч; 14 – фільтр нижніх частот; 15 – вимірювач напруги; 16 – джерело опорної напруги; 17 – диференційний підсилювач; 18 – інтегратор; 19 – електроультразвуковий випромінювач; 20 – електроультразвуковий приймач

В протилежному положенні автоматичних перемикачів 4 і 8 на полікристалічний матеріал 6 впливають непослаблені дільником напруги 3 електричні коливання, які збуджують підсилені ультразвукові коливання з амплітудою ε_2 :

$$\varepsilon_2 = U_{m2}'' S_1 = U_m k_2 S_1. \quad (3.52)$$

Амплітуда U_{m2}'' прийнятих електричних коливань з урахуванням включення діляника напруги 7 в електричний ланцюг має вигляд:

$$U_{m2}'' = \varepsilon_2 (k_6 - \Delta k_6) S_2 k_7 = U_m k_2 S_1 (k_6 - \Delta k_6) S_2 k_7, \quad (3.53)$$

де $k_6 - \Delta k_6$ – коефіцієнт поглинання полікристалічного матеріалу 6 при амплітуді ультразвукових коливань ε_2 ; k_7 – коефіцієнт масштабного перетворення діляника напруги 7.

Автоматичні перемикачі 4 і 8 керуються змінною прямокутною напругою U_K , частота f_K яка визначається коефіцієнтом ділення частоти N діляника частоти 5.

Внаслідок періодичного збільшення амплітуди напруги ($U_{m2} > U_{m1}$) на виході автоматичного перемикача 4 формуються пакети електричних коливань, що збуджують полікристалічний матеріал 6, зі співвідношенням амплітуд, яке задається діляником напруги 3. Ці коливання мають вигляд амплітудно-модульованого сигналу з прямокутною огинаючою частоти комутації f_K .

Через ультразвукову нелінійність полікристалічного матеріалу 6 співвідношення амплітуд ε_1' і ε_2' прийнятих ультразвукових коливань дещо змінюється внаслідок залежності коефіцієнтів поглинання k_6 і $k_6 - \Delta k_6$ від амплітуди коливань. В більшості випадків зі збільшенням амплітуди ультразвукових коливань поглинання цих коливань зростає. В кожен півперіод комутації $T_K = 0,5/f_K$ прийняті електричні коливання повторюють форму і розмах ультразвукових коливань. Але в результаті періодичного зменшення і збільшення амплітуди прийнятих електричних коливань діляником напруги 7 на виході автоматичного перемикача 8 формуються пакети електричних коливань зі змінним співвідношенням амплітуд.

Якщо зміни амплітуд збуджуючих і прийнятих електричних коливань здійснювати синхронно, але протифазно, а збільшення і зменшення амплітуд

електричних коливань проводити в однакову кількість разів ($k_3 = k_7$), то глибина амплітудної модуляції зменшується.

У випадку ультразвуково лінійного полікристалічного матеріалу 6 ($\Delta k_6 = 0$) амплітудна модуляція на виході автоматичного перемикача 8 зникає. Модульований сигнал, який складається з пакетів електричних коливань з певними амплітудами U_{m1}'' і U_{m2}'' , підсилюється підсилювачем 9 з регульованим коефіцієнтом підсилення і детектується амплітудним детектором 10. Фільтром нижніх частот 11 виділяється обвідна модульованого сигналу. Постійна складова напруги U_3 , пропорційна півсумі амплітуд пакетів коливань, з урахуванням рівності $k_3 = k_7$ має вигляд:

$$U_3 = 0,5k_9S_3(U_{m1}'' + U_{m2}'') = 0,5k_9S_3U_mk_2S_1S_2k_3(2k_6 - \Delta k_6), \quad (3.54)$$

де S_3 – чутливість амплітудного детектора 10; k_9 – коефіцієнт підсилення регульованого підсилювача 9.

Змінна складова напруги U_4 пропорційна піврізниці амплітуд пакетів коливань:

$$U_4 = 0,5k_9S_3(U_{m1}'' - U_{m2}'') = 0,5k_9S_3U_mk_2S_1S_2k_3\Delta k_6. \quad (3.55)$$

Змінна складова напруги U_4 з виходу фільтра нижніх частот 11 підсилюється підсилювачем змінної напруги 12 і випрямляється фазочутливим випрямлячем 13. При цьому постійна складова напруги U_3 з виходу фільтра нижніх частот 11 через підсилювач змінної напруги 12 не проходить.

Випрямлена напруга згладжується фільтром нижніх частот 14 і надходить на вхід вимірювача напруги 15. Постійна складова напруги U_3 з виходу фільтра нижніх частот 11 впливає на один із входів диференціального підсилювача 17, на інший вхід якого подано опорну напругу U_5 від джерела опорної напруги 16. Змінна складова напруги U_4 з виходу фільтра нижніх частот 11 також надходить на вхід диференціального підсилювача 17. Проте інтегратор 18 пригнічує цю складову, і вона не впливає на коефіцієнт підсилення регульованого підси-

лювача 9. На виході диференціального підсилювача створюється підсилена диференціальна напруга U_6 :

$$U_6 = k_{17}(U_3 - U_5) = k_{17}(0,5k_9S_3U_mk_2S_1S_2K_3(2k_6 - \Delta k_6) - U_5), \quad (3.56)$$

де k_{17} – коефіцієнт підсилення диференціального підсилювача 17.

Диференціальна напруга U_6 заряджає інтегратор 18, вихідна напруга якого змінює коефіцієнт підсилення регульованого підсилювача 9. Процес автоматичного регулювання коефіцієнта підсилення триває доти, поки вхідні напруги диференціального підсилювача 17 U_3 і U_5 не стануть рівними. В усталеному стані ланцюга регулювання ($U_3 = U_5$) коефіцієнт підсилення k_9 підсилювача з регульованим коефіцієнтом підсилення 9 набуває значення:

$$k_9 = \frac{2U_5}{S_3U_mk_2S_1S_2k_3(2k_6 - \Delta k_6)}. \quad (3.57)$$

Змінна складова напруги U_4 з урахуванням усталеного значення коефіцієнта підсилення k_9 набуває вигляду:

$$U_4 = U_5 \frac{\Delta k_6}{2k_6 - \Delta k_6}. \quad (3.58)$$

Напруга U_7 , що реєструється вимірювачем напруги 15, подається у вигляді:

$$U_7 = U_5 k_{12} k_{13} \frac{\Delta k_6}{2k_6 - \Delta k_6}, \quad (3.59)$$

де k_{12} – коефіцієнт підсилення підсилювача змінної напруги 12; k_{13} – коефіцієнт випрямлення фазочутливого випрямляча 13.

Значенням Δk_6 в знаменнику (3.59) можна знехтувати і вважати, що

$$U_7 = U_5 k_{12} k_{13} \frac{\Delta k_6}{2k_6}. \quad (3.60)$$

З огляду на співвідношення (3.60) отримаємо:

$$\frac{\Delta k_6}{k_6} = \frac{2U_7}{U_5 k_{12} k_{13}}. \quad (3.61)$$

Як видно з формули (3.61), відносну зміну $\Delta K/K$ коефіцієнта поглинання K пружної хвилі можна визначити, знаючи напругу U_7 , що реєструється вимірювачем напруги 15, опорну напругу U_5 джерела опорної напруги 16, коефіцієнт k_{12} підсилення підсилювача змінної напруги 12 і коефіцієнт k_{13} випрямлення фазочутливого випрямляча 13. Реєстрацію напруги U_7 і створення опорної напруги U_5 можна контролювати з відносною похибкою не гіршою ніж $(0,05 \dots 0,10)\%$, використовуючи, наприклад, прецизійні стабілітрони і термостатування, а відносну стабільність коефіцієнтів k_{12} і k_{13} можна забезпечити не гірше, ніж $(0,25 \dots 0,50)\%$.

3.6. Технічні засоби вимірювання відносної зміни $\Delta K/K$ коефіцієнта поглинання K ультразвукових хвиль в структурно-неоднорідному полікристалічному матеріалі з двонаправленим послаблювачем

Для вирішення поставленого завдання вимірювання відносної зміни $\Delta K/K$ коефіцієнта поглинання K пружних хвиль пропонується також засіб вимірювання [54], структурну схему якого показано на рис. 3.5, а реалізація здійснюється таким чином. Генератор електричних коливань 1 (рис. 3.5) створює електричні коливання

$$U_1(t) = U_{m1} \cos(2\pi f_1 t + \varphi_1), \quad (3.62)$$

де U_{m1} – амплітуда електричних коливань генератора електричних коливань 1; f_1 – частота електричних коливань генератора електричних коливань 1; φ_1 – початкова фаза електричних коливань генератора електричних коливань 1.

Електричні коливання (3.62) підсилюються підсилювачем потужності 2 і через автоматичний перемикач 3 надходять до електроультразвукового перетворювача 4, який створює в полікристалічному матеріалі 19 ультразвукові коливання

$$\varepsilon_1(t) = k_2 S_4 U_{m1} \cos(2\pi f_1 t + \varphi_1), \quad (3.63)$$

де k_2 – коефіцієнт підсилення підсилювача потужності 2; S_4 – крутизна перет-

ворення електричних коливань в ультразвукові електроультразвукового перетворювача 4.

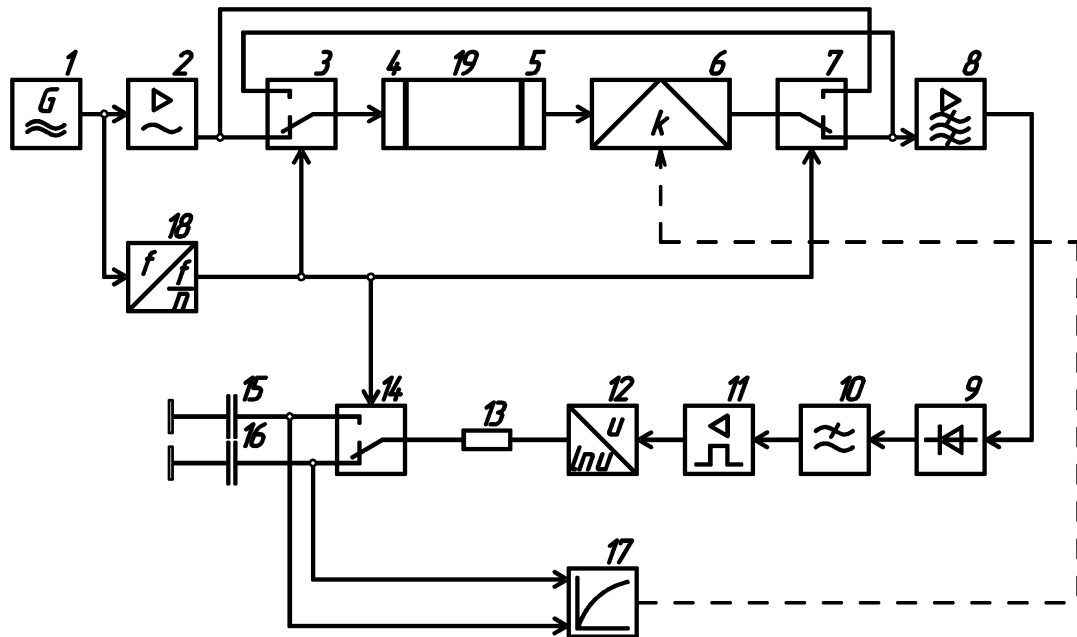


Рис. 3.5. Структурна схема засобу вимірювання відносної зміни $\Delta K/K$ коефіцієнта поглинання K пружних хвиль у структурно-неоднорідному полікристалічному матеріалі з двонаправленим послаблювачем напруги: 1 – генератор електричних коливань; 2 – підсилювач потужності; 3 – автоматичний перемикач; 4 – електроультразвуковий перетворювач; 5 – електроультразвуковий перетворювач; 6 – двонаправлений послаблювач напруги; 7 – автоматичний перемикач; 8 – селективний підсилювач; 9 – амплітудний детектор; 10 – фільтр нижніх частот; 11 – підсилювач відеоімпульсів; 12 – логарифматор; 13 – постійний резистор; 14 – автоматичний перемикач; 15 – конденсатор; 16 – конденсатор; 17 – вимірювач напруги; 18 – дільник частоти; 19 – полікристалічний матеріал

Ультразвукові коливання (3.63) проходять через полікристалічний матеріал 19 і можуть бути описані наступним виразом:

$$\varepsilon_2(t) = k_2 S_4 k_{19}' U_{m1} \cos(2\pi f_1 t + \varphi_2), \quad (3.64)$$

де k_{19}' – коефіцієнт поглинання полікристалічного матеріалу 19 при певному рівні зондувальних ультразвукових коливань (3.63); φ_2 – початкова фаза ультразвукових коливань.

Електроультразвуковим перетворювачем 5 ультразвукові коливання (3.64) знову перетворюються на електричні коливання:

$$U_2(t) = k_2 S_4 k_{19}' S_5 U_{m1} \cos(2\pi f_1 t + \varphi_2), \quad (3.65)$$

де S_5 – крутизна перетворення ультразвукових коливань на електричні електроультразвукового перетворювача 5.

Електричні коливання (3.65) зменшують за амплітудою двонаправленим ослаблювачем напруги 6 (рис. 3.6) до значення

$$U_3(t) = k_2 S_4 k_{19}' S_5 k_6 U_{m1} \cos(2\pi f_1 t + \varphi_2), \quad (3.66)$$

де k_6 – коефіцієнт передачі двонаправленого ослаблювача напруги 6 ($k_6 < 1$).

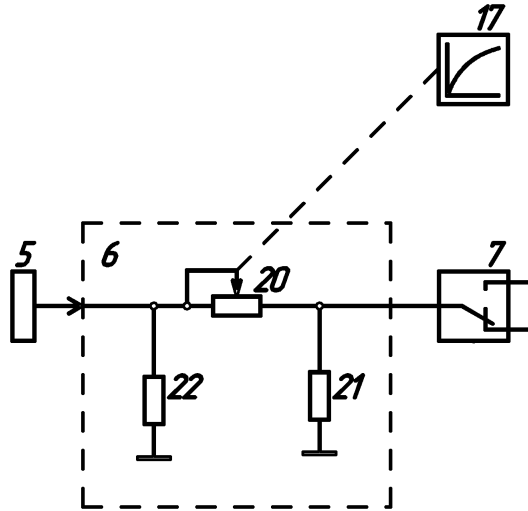


Рис. 3.6. Структурна схема двонаправленого ослаблювача напруги 6: 5 – електроультразвуковий перетворювач; 7 – автоматичний перемикач; 17 – вимірювач напруги; 20 – змінний резистор; 21 – постійний резистор; 22 – постійний резистор

Електричні коливання (3.66) через другий автоматичний перемикач 7 надходять на вхід селективного підсилювача 8, налаштованого на частоту f_1 генератора електричних коливань 1.

В разі перемикання першого і другого автоматичних перемикачів 3 і 7 в протилежні положення на електроультразвуковий перетворювач 5 починають надходити електричні коливання з виходу підсилювача потужності 2, ослаблені двонаправленим послаблювачем напруги 6:

$$U_4(t) = k_2 k_6 U_{m1} \cos(2\pi f_1 t + \varphi_1). \quad (3.67)$$

Ультразвукові коливання для зазначеного напрямку

$$\varepsilon_3(t) = k_2 k_6 S_5 U_{m1} \cos(2\pi f_1 t + \varphi_3) \quad (3.68)$$

проходять через полікристалічний матеріал 19 і приймаються електроультразвуковим перетворювачем 4.

Зменшення рівня ультразвукових коливань, що зондують полікристалічний матеріал 19, призводить до зміни коефіцієнта поглинання матеріалу 19 і, як наслідок, до зміни рівня електричних коливань на виході електроультра звукового перетворювача 4:

$$U_5(t) = k_2 S_4 k_{19}'' S_5 k_6 U_{m1} \cos(2\pi f_1 t + \varphi_5), \quad (3.69)$$

де $k_{19}'' = k_{19}' + \Delta k_{19}$ – змінений на Δk_{19} коефіцієнт поглинання полікристалічного матеріалу 19 при зменшеному рівні ультразвукових коливань, що зондують матеріал.

Електричні коливання (3.69) також підсилюються селективним підсилювачем 8 на частоті основної гармоніки f_1 . При періодичній роботі першого 3 і другого 7 автоматичних перемикачів, перемикання яких керується дільником частоти 18, селективним підсилювачем 8 по чергово підсилюються пакети електричних коливань (3.66) і (3.69) тривалістю в півперіод керуючої напруги дільника частоти 18.

Пакети електричних коливань (3.66) і (3.69) по чергово детектуються амплітудним детектором 9 і згладжуються фільтром нижніх частот 10. В результаті такого усереднення з пакетів електричних коливань (3.66) і (3.69) формується послідовність відеоімпульсів з різними амплітудами:

$$U_6(t) = k_2 S_4 k_{19}' S_5 k_6 k_8 S_9 k_{10} U_{m1}, \quad (3.70)$$

$$U_7(t) = k_2 S_4 k_{19}'' S_5 k_6 k_8 S_9 k_{10} U_{m1}, \quad (3.71)$$

де k_8 – коефіцієнт підсилення селективного підсилювача 8; S_9 – крутизна перетворення амплітудного детектора 9; k_{10} – коефіцієнт передачі фільтра нижніх частот 10.

Відеоімпульси (3.70) і (3.71) по черзі підсилюються підсилювачем відеоімпульсів 11 і логарифмуються логарифматором 12:

$$U_8(t) = S_{12} \ln(k_2 S_4 k_{19}' S_5 k_6 k_8 S_9 k_{10} k_{11} U_{m1}), \quad (3.72)$$

$$U_9(t) = S_{12} \ln(k_2 S_4 k_{19}'' S_5 k_6 k_8 S_9 k_{10} k_{11} U_{m1}). \quad (3.73)$$

де k_{11} – коефіцієнт підсилення підсилювача відеоімпульсів 11; S_{12} – крутизна логарифмічного перетворення відеоімпульсів логарифматора 12.

За допомогою третього автоматичного перемикача 14, який перемикається синхронно з першим 3 і другим 7 автоматичними перемикачами, відеоімпульси (3.72) і (3.73) розділяються в часі і заряджають конденсатори 15 і 16. Постійний резистор 13 з кожним із конденсаторів 15 і 16 створює інтегруючі запам'ятовуючі комірки. Конденсатор 15 заряджається до напруги

$$U_{10} = k_{13}U_8, \quad (3.74)$$

а конденсатор 16 заряджається до напруги

$$U_{11} = k_{13}U_9, \quad (3.75)$$

де k_{13} – коефіцієнт передачі інтегруючих ланок.

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

$$U_{12} = U_{11} - U_{10}. \quad (3.76)$$

Враховуючи, що різниця логарифмів дорівнює логарифму відношення, отримаємо:

$$U_{12} = k_{13}S_{12} \ln \left(\frac{k_{19}''}{k_{19}'} \right). \quad (3.77)$$

З отриманого виразу (3.77) можна побачити, що результат вимірювання за показаннями вимірювача напруги 17 визначається лише відношенням коефіцієнтів поглинання полікристалічного матеріалу 19 при двох рівнях ультразвукових коливань, які встановлюються двонаправленим ослаблювачем напруги 6, і не залежить від абсолютного рівня ультразвукових коливань. На результат вимірювання також не впливає несталість значень крутизни перетворення електроультразвукових перетворювачів S_4 і S_5 , коефіцієнтів підсилення підсилювачів k_2 , k_8 і k_{11} , коефіцієнта передачі фільтра нижніх частот k_{10} , коефіцієнта передачі інтегровальних комірок k_{13} , крутизни перетворення амплітудного детектора S_9 . Результат вимірювання (3.77) можна подати у вигляді

$$U_{12} = k_{13} S_{12} \ln \left(\frac{k_{19}' + \Delta k_{19}}{k_{19}'} \right) = k_{13} S_{12} \ln \left(1 + \frac{\Delta k_{19}}{k_{19}'} \right). \quad (3.78)$$

Враховуючи, що відносна зміна коефіцієнта поглинання полікристалічного матеріалу 19 є малою $\left(\frac{\Delta k_{19}}{k_{19}'} \ll 1 \right)$ і розкладаючи логарифмічну функцію (3.78) в ступеневий ряд, отримаємо:

$$U_{12} = k_{13} S_{12} \left(\frac{\Delta k_{19}}{k_{19}'} - \left(\frac{\Delta k_{19}}{k_{19}'} \right)^2 + \left(\frac{\Delta k_{19}}{k_{19}'} \right)^3 - \dots \right). \quad (3.79)$$

Нехтуючи величинами другого і вищих порядків малості, остаточно отримуємо:

$$U_{12} = k_{13} S_{12} \left(\frac{\Delta k_{19}}{k_{19}'} \right). \quad (3.80)$$

З урахуванням співвідношення (3.80) отримуємо:

$$\frac{\Delta k_{19}}{k_{19}'} = \frac{U_{12}}{k_{13} S_{12}}. \quad (3.81)$$

Коефіцієнт передачі двонаправленого ослаблювача напруги 6 визначається опорами змінного резистора і постійних резисторів 20, 21 і 22, які входять до його складу, за будь-якого напрямку проходження електричних коливань:

$$k_6 = \frac{R_{20}}{R_{20} + R_{21}} = \frac{R_{20}}{R_{20} + R_{22}}, \quad (3.82)$$

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

Як можна побачити з формули (3.80), відносну зміну $\Delta K/K$ коефіцієнта поглинання K пружної хвилі можна визначити, знаючи напругу U_{12} вимірювача напруги 17, коефіцієнт k_{13} передачі інтегруючих комірок, що складаються, відповідно, з постійного резистора 13 і конденсатора 15 та з постійного резистора 13 і конденсатора 16, і крутизну S_{12} логарифмічного перетворення відеоімпульсів логарифматора 12.

Реєстрацію напруги U_{12} можна контролювати з відносною похибкою не гіршою ніж $(0,05...0,10)\%$, використовуючи, наприклад, прецизійні стабілітрони і термостатування. Відносна стабільність коефіцієнта k_{13} залежить від відносних похибок виготовлення постійного резистора і двох конденсаторів, які, відповідно, можуть бути не гіршими $\pm(0,05...0,10)\%$ і $\pm(0,2...0,5)\%$. Найбільшу відносну нестабільність матиме крутизна S_{12} , відносну похибку якої за відповідного схемного рішення можна зменшити до рівня не гіршого $\pm(0,5...1,0)\%$.

Таким чином:

1. Контроль параметрів пружної хвилі можливо здійснювати двома основними групами засобів неруйнівного ультразвукового нелінійного контролю: вимірюючи зміну $\Delta c/c$ фазової швидкості пружної хвилі c і зміну $\Delta K/K$ коефіцієнта поглинання K . Такі зміни $\Delta c/c$ і $\Delta K/K$ виникають внаслідок проходження ультразвукової хвилі у вигляді пакетів коливань з більшими і меншими амплітудами.

2. Випромінювання і прийом пакетів ультразвукових коливань синхронно і в протифазі дозволяє досягти практично однакового рівня прийнятих електричних коливань. Завдяки цьому суттєво знижується власний рівень нелінійних спотворень в електронних блоках вимірювальних схем.

3. В кожному з розроблених засобів ультразвукового нелінійного контролю передбачено наявність лише кількох високоточних елементів вимірювальної схеми (наприклад, фазообертачів, генераторів синусоїдальних коливань або ділників напруги), що дозволяє оптимізувати витрати на створення автоматизованих систем ультразвукового нелінійного контролю міцності полікристалічних матеріалів і встановлювати їх оптимальні режими роботи. Запропоновані засоби ультразвукового нелінійного контролю передбачають напіваавтоматичне або повністю автоматичне виконання вимірювань, що відкриває широкі можливості для побудови повністю комп'ютеризованих вимірювальних комплексів на їх основі.

4. Розроблені засоби неруйнівного ультразвукового нелінійного контролю повністю вирішують задачу вимірювання зміни $\Delta c/c$ фазової швидкості пружної хвилі c і зміни $\Delta K/K$ коефіцієнта поглинання K пружної хвилі з достатньою високою точністю.

4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ СТРУКТУРНО-НЕОДНОРІДНИХ ПОЛІКРИСТАЛІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

4.1. Експериментальна установка для визначення нелінійних параметрів ультразвукової хвилі

Як було визначено раніше, для перевірки першої і другої гіпотез необхідно провести експериментальні дослідження. З цією метою було створено експериментальну установку, структурну схему якої наведено на рис. 4.1. Установка призначена для вимірювання параметрів $\Delta c/c$ і $\Delta K/K$ ультразвукової хвилі в полікристалічних матеріалах в низькочастотному діапазоні частот до $(200...300)$ кГц з можливістю отримання амплітуди ε_m відносної деформації матеріалу до $10^{-6}...10^{-5}$.

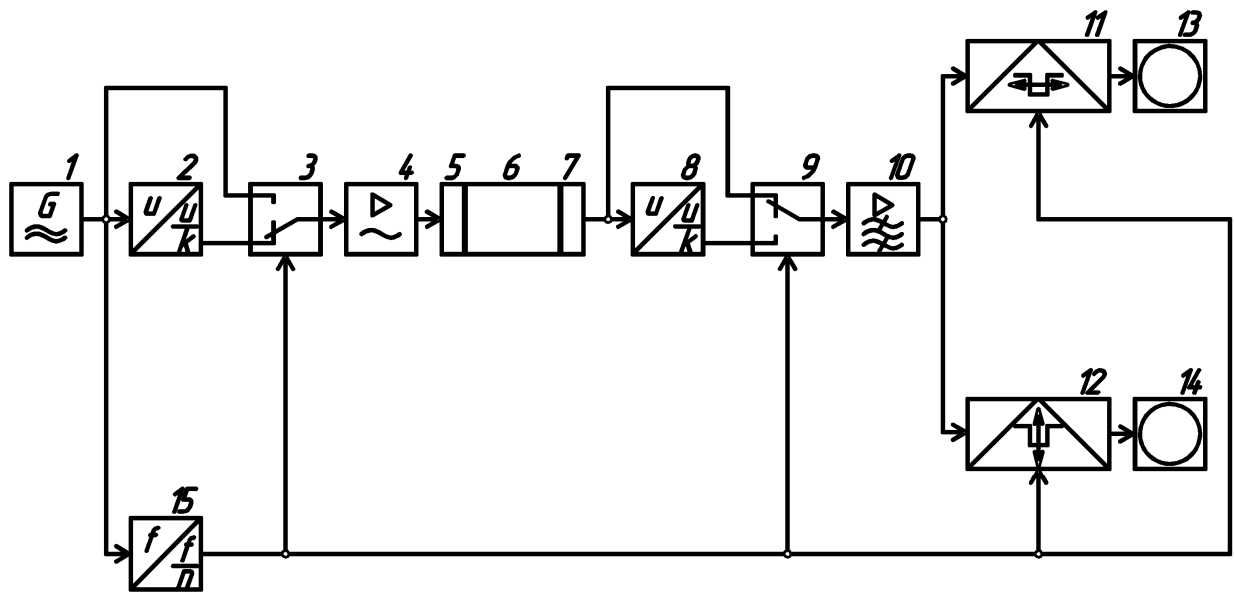


Рис. 4.1. Структурна схема експериментальної установки для визначення ультразвукових нелінійних параметрів ультразвукової хвилі: 1 – генератор електричних коливань; 2 – дільник напруги; 3 – перемикач; 4 – підсилювач потужності; 5 – п'єзокерамічний випромінювач; 6 – зразок з полікристалічного матеріалу; 7 – п'єзокерамічний приймач; 8 – дільник напруги; 9 – перемикач; 10 – вибіркового підсилювач; 11 – фазовий детектор; 12 – амплітудний детектор; 13, 14 – вимірювальний прилад; 15 – дільник частоти

Верхній діапазон частот до $(200...300)$ кГц експериментальної установки визначався тим, що в цьому діапазоні найсильніше проявляється гістерезисна нелінійність полікристалічного матеріалу, а впливом дисипативної нелінійності можна знехтувати. В цьому випадку феноменологічне рівняння стану (1.39) з

нелінійними функціями гістерезису тертя (1.40) і гістерезису відриву (1.41) адекватно описує розповсюдження ультразвукової хвилі через полікристалічний матеріал.

Установка складалася з генератора електричних коливань 1, що мав верхній діапазон частот $(200 \dots 300) \text{ кГц}$, можливість перебудовувати частоту з кроком не більше 10 Гц , а також власний рівень нелінійних спотворень не більше $(0,5 \dots 1,0)\%$. За допомогою дільника напруги 2 і перемикача 3 формувалися пакети електричних коливань, які підсилювалися підсилювачем потужності 4 і за допомогою п'єзокерамічного випромінювача 5 випромінювалися в зразок з полікристалічного матеріалу 6. Пакети ультразвукових коливань приймалися п'єзокерамічним приймачем 7, після чого їх амплітуди вирівнювалися за допомогою перемикача 9 і дільника напруги 8. За рахунок ультразвукової нелінійності зразка з полікристалічного матеріалу 6 більший і менший пакети електричних коливань, підсилені вибіркоким підсилювачем 10, відрізнялися між собою.

Відмінність полягала в тому, що фазові швидкості більшого і меншого пакетів були різними, внаслідок чого виникала відносна зміна $\Delta c/c$ фазової швидкості c ультразвукової хвилі. А також у тому, що поглинання більшого і меншого пакетів були різними, внаслідок чого виникала відносна зміна $\Delta K/K$ коефіцієнта поглинання K ультразвукової хвилі.

Зміна $\Delta c/c$ призводила до появи фазового зсуву між більшим і меншим із пакетів електричних коливань, що виділявся за допомогою фазового детектора 11. А зміна $\Delta K/K$ призводило до появи різниці амплітуд між більшим і меншим із пакетів електричних коливань, що виділялася за допомогою амплітудного детектора 12. Значення вихідних сигналів фазового детектора 11 і амплітудного детектора 12 вимірювалися за допомогою, відповідно, вимірювального приладу 13 і вимірювального приладу 14. Перемикач 3, перемикач 9, фазовий детектор 11 і амплітудний детектор 12 синхронно керувалися від дільника частоти 15.

Для проведення експериментальних досліджень вибір було зупинено на латунних пресованих круглих і шестигранних прутках ЛС59-1 ДСТУ ГОСТ 2060:2007, загальний вигляд яких наведено на рис. 4.2. Довжина прутків становила $(300...500)$ мм, діаметр круглих прутків – $(20...30)$ мм, а сторона шестигранних прутків – $(5...10)$ мм.



Рис. 4.2. Експериментальні зразки прутків з латуні ЛС59-1

Вибір латуні ЛС59-1 як експериментального зразка обґрунтовувався тим, що цей конструкційний матеріал широко застосовується для виготовлення втулок, дисків, стержнів, корпусів, кронштейнів і інших виробів. Для проведення ультразвукових вимірювань (випромінювання і приймання поздовжніх пружних хвиль) використовувалися торці зразків, які шліфувалися для забезпечення нерівності не більше ніж $(2...3)^\circ$ і шорсткості не гіршої ніж $Rz\ 25...Rz\ 32$.

Для подальших досліджень на розрив зразки додатково механічно оброблялися для забезпечення зручного захвату в розривній машині УМ-5.

4.2. Розрахунок і вибір параметрів електроультразвукового тракту випромінювання/приймання

Для випромінювання і приймання пакетів ультразвукових коливань використовувалися п'єзоелектричні керамічні перетворювачі, які, відповідно, випромінювали і приймали ультразвукові хвилі на одномірній високочастотній моді з частотою генератора електричних коливань 1, як показано на рис. 4.3.

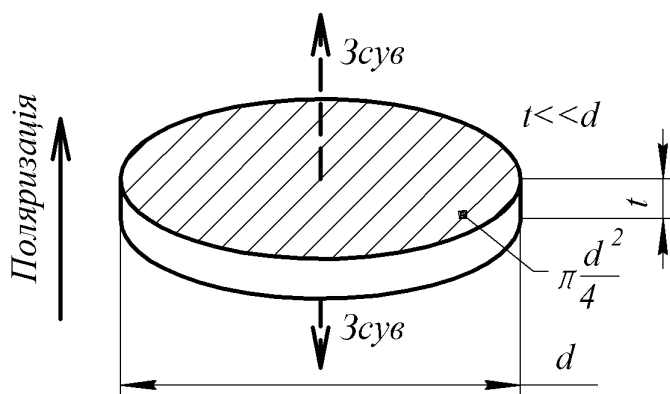


Рис. 4.3. Одномірна високочастотна мода коливань п'єзоелектричного керамічного перетворювача

Як п'єзоелектричний випромінювач 5, так і п'єзоелектричний приймач 7 використовувалися у вигляді круглих елементів (дисків) [14]. Зовнішній вигляд випромінювача 5 і приймача 7 (без додаткових елементів армування, герметизації і з'єднання з корпусом) показано на рис. 4.4.



Рис. 4.4. Зовнішній вигляд п'єзокерамічного випромінювача та п'єзокерамічного приймача

Конструктивно п'єзоелектричні перетворювачі 5 і 7 містили активний елемент (безпосередньо сам перетворювач), елементи армування, елементи герметизації і елементи з'єднання з корпусом. Як активний елемент використовувалася п'єзокераміка на основі цирконату-титанату свинцю ЦТС-19, призначена для виготовлення високочутливих п'єзокерамічних елементів, які працюють в режимі випромінювання і/або приймання за умов слабких і помірних електричних і/або механічних напружень (І клас згідно з ГОСТ 13927-80 "Матеріали п'єзокерамічні. Технічні умови"). Необхідно зазначити, що у використуваній експериментальній установці значення пружних констант п'єзокераміки ЦТС-19, згідно з [14], могли відрізнятися від довідкових значень на $\pm 5\%$, п'єзоелектричних констант на $\pm 10\%$, а діелектричних констант на $\pm 20\%$.

В режимі випромінювання для отримання максимальної амплітуди ε_m відносної деформації п'єзокерамічний перетворювач 5 працював в смузі частот першого послідовного резонансу f_s на п'єзоелектрично жорсткій товщинній моді коливань, де його чутливість досягала максимуму, оскільки максимуму досягала активна складова його повної провідності Y_{II} (за добротності $Q \geq 50$ перетворювача частоти послідовного резонансу f_s і максимуму активної складової повної провідності Y_{II} практично збігаються). В режимі прийому для отримання максимальної амплітуди U електричних коливань п'єзокерамічний перетворювач 7 працював в смузі частот першого паралельного резонансу (антирезонансу) f_p також на п'єзоелектрично жорсткій товщинній моді коливань, де його чутливість досягала максимуму, оскільки максимуму досягала активна складова його повного опору Z_{II} .

Для отримання максимальної амплітуди ε_m відносної деформації в полікристалічному матеріалі було необхідно не тільки, щоб п'єзокерамічний випромінювач 5 працював в смузі частот першого послідовного резонансу f_s , але і був узгоджений із підсилювачем потужності 4. Випромінювання ультразвукової хвилі в зразок з полікристалічного матеріалу 6 по відношенню до п'єзокерамічного випромінювача 5 було фактично однобічним, оскільки ультразвуковий опір повітря $Z_{пов} = 417 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ дуже малий. Тому ультразвукове навантаження п'єзокерамічного випромінювача 5 визначалося переважно питомим ультразвуковим опором $Z_{л}$ полікристалічного матеріалу, який для латуні ЛС 59-1 за прийнятих значень $\rho_{ЛС 59-1} = 8450 \text{ кг}/\text{м}^3$ і $c_{ЛС 59-1} = 4600 \text{ м}/\text{с}$ становив

$$Z_{ЛС 59-1} = \rho_{ЛС 59-1} c_{ЛС 59-1} = 8450 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 4600 \frac{\text{м}}{\text{с}} = 3,887 \cdot 10^7 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}. \quad (4.1)$$

Внаслідок цього п'єзокерамічний випромінювач 5 підключався до підсилювача потужності 4 через електричні узгоджувальні кола. Узгодження полягало у виконанні двох умов: рівності внутрішньої провідності Y_r (величини, обе-

рненої до вихідного опору) R_r) підсилювача потужності 4 і дійсної частини повної провідності Y_{II} п'єзокерамічного випромінювача 5 [14]

$$Y_r = \operatorname{Re}(Y_{II}), \quad (4.2)$$

а також рівності нулю уявної частини суми комплексної провідності Y_E електричної сторони п'єзокерамічного випромінювача 5 і повної провідності Y_{II} п'єзокерамічного випромінювача 5

$$\operatorname{Im}(Y_E + Y_{II}) = 0. \quad (4.3)$$

Для виконання умов (4.2) і (4.3) було застосовано електричний узгоджувальний ланцюг, що являв собою фільтр драбинкового типу (рис. 4.5). Як джерело змінної напруги U_r використовувався підсилювач потужності 4, а як опір R_r використовувався вихідний опір підсилювача потужності 4. Внаслідок виконання умов (4.2) і (4.3) було отримано, що значення індуктивностей L_1 і L_3 становлять $(0,001 \dots 0,002) \text{ Гн}$, значення індуктивностей L_2 і L_4 – $(0,01 \dots 0,02) \text{ Гн}$, значення ємностей C_2 і C_4 – $(50 \dots 150) \text{ нФ}$, а значення ємності C_3 – $(10 \dots 20) \text{ нФ}$.

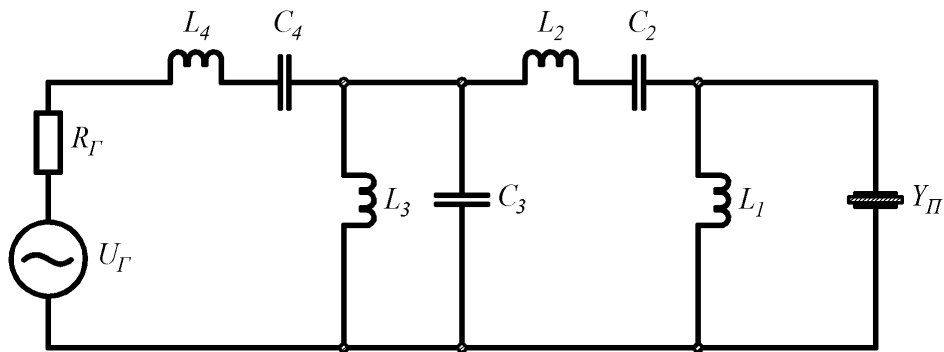


Рис. 4.5. Схема електричного узгоджувального контуру (фільтр драбинчастого типу)

Розрахунок електроультразвукових параметрів п'єзокерамічного випромінювача 5 і п'єзокерамічного приймача 7 виконано згідно з рекомендаціями, наведеними в [14]. Як моделі п'єзоелектричних перетворювачів використовували повну еквівалентну схему (рис. 4.6) для поздовжніх коливань елементів круглої форми (дисків) з електричним полем, паралельним до напрямку коливань (п'єзоелектрично жорстка товщинна мода коливань).

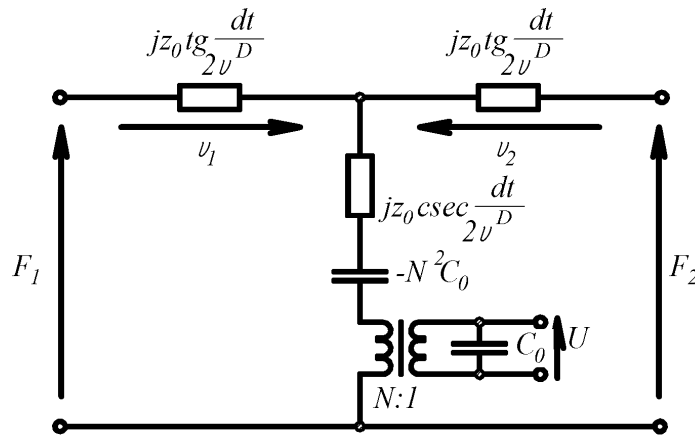


Рис. 4.6. Повна еквівалентна схема для поздовжніх коливань елементів круглої форми (дисків)

Характерною особливістю еквівалентної схеми була наявність ідеального трансформатора, який зв'язує механічну і електричну сторони п'єзокерамічного перетворювача, коефіцієнт електромеханічної трансформації якого дорівнює відношенню зовнішньої статичної сили до генерованої нею внутрішньої електричної напруги на п'єзокерамічному перетворювачі, затиснутому в напрямку поздовжніх коливань.

На основі даних [14] було прийнято, що густина ρ п'єзокераміки ЦТС-19 становить 7330 кг/м^3 , електрична стала $\epsilon_0 = 1/(4\pi \cdot 9 \cdot 10^9) \text{ Ф/м}$, п'єзоконстанта $\epsilon_{33}^S = 8,27 \cdot 10^{-9} \text{ Ф/м}$, п'єзоконстанта $h_{33} = 17,8 \cdot 10^8 \text{ В/м}^2$, п'єзоконстанта $c_{33}^D = 13,2 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$. Діаметр d елемента круглої форми (диска) було обрано рівним $0,045 \text{ м}$.

Товщина t п'єзокерамічного випромінювача 5 була обрана рівною $(0,0200 \pm 0,0005) \text{ м}$. В результаті розрахунків для випромінювача 5 було отримано, що

$$C_0 = \frac{\pi d^2}{4t} \epsilon_{33}^S = 657,4 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}, \quad (4.4)$$

$$N = C_0 h_{33} = 1,17, \quad (4.5)$$

$$v^D = \sqrt{\frac{c_{33}^D}{\rho}} = 4243,6 \frac{\text{м}}{\text{с}}, \quad (4.6)$$

$$z_0 = \frac{\pi \rho v^D d^2}{4} = 49471 \text{ Ом}, \quad (4.7)$$

де C_0 – ємність п'єзокерамічного випромінювача 5, затиснутого в напрямі поздовжніх коливань; N – коефіцієнт електромеханічного перетворення; v^D – швидкість розповсюдження пружної хвилі в п'єзокерамічному випромінювачі 5, затиснутому в напрямі поздовжніх коливань; z_0 – хвильовий опір п'єзокерамічного випромінювача 5.

Товщина t п'єзокерамічного приймача 7 було обрано рівною $(0,0240 \pm 0,0005) \text{ м}$. В результаті розрахунків для приймача 7 також було отримано, що

$$C_0 = \frac{\pi d^2}{4t} \varepsilon_{33}^S = 547,9 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}, \quad (4.8)$$

$$N = C_0 h_{33} = 0,98. \quad (4.9)$$

$$v^D = \sqrt{\frac{c_{33}^D}{\rho}} = 4243,6 \frac{\text{м}}{\text{с}}, \quad (4.10)$$

$$z_0 = \frac{\pi \rho v^D d^2}{4} = 49471 \text{ Ом}, \quad (4.11)$$

Значення v^D і z_0 для п'єзокерамічного приймача 7 співпадали, відповідно, зі значеннями v^D і z_0 для п'єзокерамічного випромінювача 5.

Оскільки верхній діапазон частот експериментальної установки становив $(200 \dots 300) \text{ кГц}$, то врахування дисипації енергії в матеріалі п'єзокерамічного випромінювача 5 і п'єзокерамічного приймача 7 шляхом введення комплексних констант (наприклад, $\varepsilon = \varepsilon' + j\varepsilon''$, $h = h' + jh''$ і $c = c' + jc''$) не проводилося. Добротність Q п'єзокераміки ЦТС-19 приймалася приблизно рівною 50 [14]. Оскільки передбачалося працювати на частотах не вище другого послідовного резонансу для п'єзокерамічного випромінювача 5 і другого паралельного резонансу (антирезонансу) для п'єзокерамічного приймача 7, кількість розрахованих резонансних частот обмежувалася значенням

$$n = 2, \quad (4.12)$$

оскільки під час роботи на частотах, вищих за частоти других резонансів, чутливість п'єзокерамічного випромінювача 5 і п'єзокерамічного приймача 7 суттєво знижувалася.

Для визначення частот послідовних резонансів f_{S_n} п'єзокерамічного випромінювача 5 і паралельних резонансів (антирезонансів) f_{P_n} п'єзокерамічного приймача 7 було застосовано багаторезонансну еквівалентну схему для поздовжніх коливань елементів круглої форми (дисків) (рис. 4.7). Схема являла собою двополіусник, що містив статичну ємність C_0 і активний опір R_0 , паралельно до яких під'єднувалися послідовні коливальні контури $L_n - C_n - R_n$.

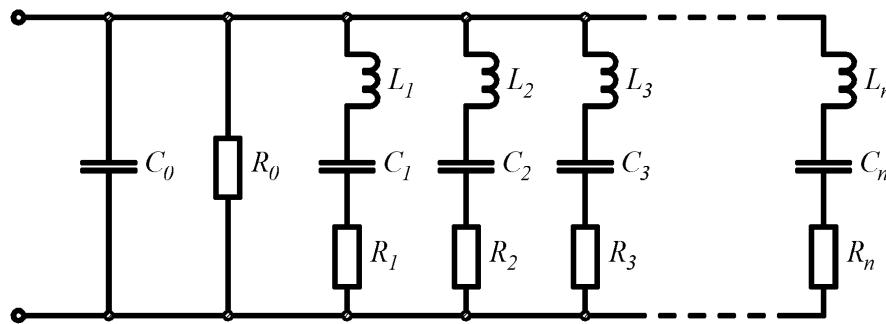


Рис. 4.7. Багаторезонансна еквівалентна схема для поздовжніх коливань елементів круглої форми (дисків)

Для п'єзокерамічного випромінювача параметр 5 C_0 було отримано з формули (4.4), параметр N – з формули (4.5), параметр ν^D – з формули (4.6), а параметр z_0 – з формули (4.7). Індуктивності L_n визначалися за формулою

$$L_n = \frac{m}{8N^2}, \quad (4.13)$$

звідки

$$L_1 = 21,3 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}, \quad L_2 = 21,3 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}. \quad (4.14)$$

Ємності C_n визначалися за формулою

$$C_n = \left(\frac{\pi^2 (2n-1)^2}{8} \frac{\pi d^2 c_{33}^D}{4s_{33}^D t} - \frac{1}{C_0} \right)^{-1}, \quad (4.15)$$

звідки

$$C_1 = 149,3 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}, \quad C_2 = 13,8 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}. \quad (4.16)$$

Відповідно, частоти f_{S_n} послідовних резонансів визначалися за формулою

$$f_{S_n} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_n C_n}}, \quad (4.17)$$

звідки

$$f_{S_1} = 89,3 \cdot 10^3 \text{ Гц}, \quad f_{S_2} = 293,7 \cdot 10^3 \text{ Гц}. \quad (4.18)$$

Для п'єзокерамічного приймача параметр 7 C_0 було отримано з формули (4.8), параметр N – з формули (4.9), параметр v^D – з формули (4.10), а параметр z_0 – з формули (4.11). Згідно з виконаними розрахунками індуктивності L_n становили

$$L_1 = 36,8 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}, \quad L_2 = 36,8 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}, \quad (4.19)$$

ємності C_n становили

$$C_1 = 156,4 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}, \quad C_2 = 13,9 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}, \quad (4.20)$$

а частоти f_{P_n} паралельних резонансів (антирезонансів) становили

$$f_{P_1} = 88,4 \cdot 10^3 \text{ Гц}, \quad f_{P_2} = 265,2 \cdot 10^3 \text{ Гц}. \quad (4.21)$$

Порівняння формул (4.18) і (4.21) показало, що частота першого паралельного резонансу (антирезонансу) f_{P_1} була близькою до частоти першого послідовного резонансу f_{S_1} , а частота другого паралельного резонансу (антирезонансу) f_{P_2} була близькою до частоти другого послідовного резонансу f_{S_2} . Таким чином, існувала можливість роботи на двох частотах, приблизно рівних $90,0 \text{ кГц}$ і $290,0 \text{ кГц}$, за максимальної чутливості п'єзокерамічного випромінювача 5 і п'єзокерамічного приймача 7.

Слід також зазначити, що в режимі випромінювання п'єзокерамічний випромінювач 5 і в режимі приймання п'єзокерамічний приймач 7 навантажені на практично однобічне нелінійне ультразвукове навантаження, яким є зразок із полікристалічного матеріалу 6 (рис. 4.1). Тому, внаслідок наявності «приєднаної маси», а також через нестабільність параметрів матеріалу п'єзокераміки

ЦТС-19 (для пружних констант – на $\pm 5\%$, п'єзоелектричних – на $\pm 10\%$, діелектричних – на $\pm 20\%$ згідно [14]), дійсні значення частот послідовних резонансів f_{S_n} і частот паралельних резонансів (антирезонансів) f_{P_n} незначно відрізнялися від розрахованих на $\pm(2 \dots 5)\%$. Для уточнення дійсних значень частот f_{S_n} і f_{P_n} було застосовано експериментальний метод амплітудних вимірювань, що описаний в [14], який широко розповсюджений з огляду на задовільну точність і простоту реалізації (рис. 4.8).

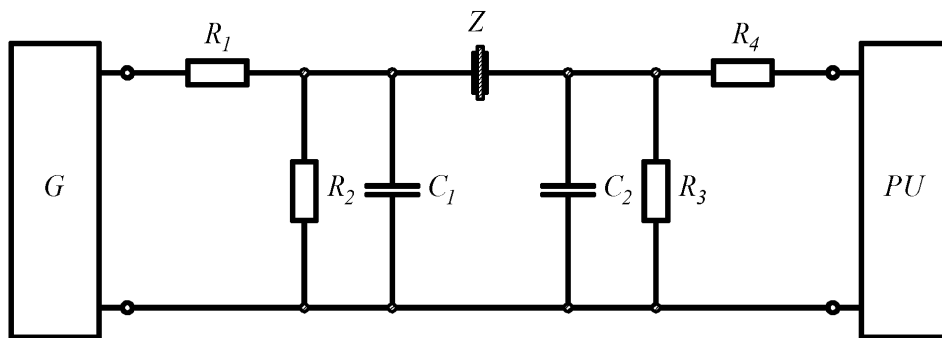


Рис. 4.8. Схема методу амплітудних вимірювань для визначення резонансних частот елементів круглої форми (дисків)

Вимірювальна схема, що реалізує метод амплітудних вимірювань, містила генератор гармонічних коливань G , резистори R_1 , R_2 , R_3 і R_4 , досліджуванний п'єзокерамічний випромінювач 5 (або п'єзокерамічний приймач 7) Z і індикатор напруги PU . Конденсатори C_1 і C_2 представляли собою наявні паразитні ємності електричного монтажу. Під час визначення частоти f_{S_n} першого і наступних послідовних резонансів генератор G налаштовувався на частоту, за якої досягалася максимальна амплітуда напруги U , яка фіксувалася індикатором напруги PU , що відповідало частотам f_{m_n} максимуму модуля повної провідності Y_{II} п'єзокерамічного перетворювача (за добротності $Q \geq 50$ п'єзокерамічного матеріалу частоти f_{S_n} і f_{m_n} практично збігаються). Також, при визначенні частоти f_{P_n} першого і наступних паралельних резонансів (антирезонансів), генератор G налаштовувався на частоту, за якої досягалася мінімальна амплітуда напруги U , яка фіксувалася індикатором напруги PU , що відповідала

ло частотам f_{n_n} мінімуму модуля повної провідності Y_{II} п'єзокерамічного перетворювача (за добротності $Q \geq 50$ п'єзокерамічного матеріалу частоти f_{n_n} і f_{P_n} також практично збігаються).

Резистори R_1 , R_2 , R_3 і R_4 обиралися з наступних міркувань, враховуючи значення імпедансу п'єзокерамічного перетворювача згідно з (4.7) і (4.11). Оскільки опір R_2 мав бути щонайменше вдесятеро меншим за мінімальний модуль хвильового опору z_0 п'єзокерамічного перетворювача, то було прийнято, що $R_2 = 100,0 \text{ Ом}$. Для виконання співвідношення $R_2/R_1 = 1/10$ було прийнято, що $R_1 = 1000,0 \text{ Ом}$. Оскільки струм через резистор R_3 мав майже повністю визначатися опором п'єзокерамічного перетворювача, то було прийнято, що $R_3 = 100,0 \text{ Ом}$. Оскільки резистор R_4 мав мати опір щонайменше в десять разів більший, ніж опір резистора R_3 (для виключення впливу вхідного імпедансу індикатора напруги PU), то було визначено, що $R_4 = 1000,0 \text{ Ом}$. Впливом ємностей C_1 і C_2 , що дорівнюють приблизно $(50 \dots 100) \text{ нФ}$, можна було знехтувати, оскільки вимірювання проводилися в діапазоні частот до $(200 \dots 300) \text{ кГц}$.

Відносна похибка вимірювання частот f_{S_n} послідовних резонансів, а також частот f_{P_n} паралельних резонансів (антирезонансів), пов'язана з відносною похибкою S індикатора напруги PU , не перевищувала 10^{-3} .

Електроультразвуковий режим роботи п'єзокерамічного випромінювача 5 в рамках математичної моделі, що відповідає поздовжнім товщинним коливанням елемента круглої форми (диска), поляризованого за товщиною, описувався системою з чотирьох рівнянь, яка включає в себе рівняння руху (4.22), рівняння прямого п'єзоефекту (4.23), рівняння зворотного п'єзоефекту (4.24) і рівняння електростатики (4.25):

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma}{\partial z}, \quad (4.22)$$

$$\sigma = C_{33}^E \frac{\partial u}{\partial z} - e_{33} E, \quad (4.23)$$

$$D = \varepsilon_{33}^S E + e_{33} \frac{\partial u}{\partial z}, \quad (4.24)$$

$$\frac{\partial D}{\partial z} = 0, \quad (4.25)$$

де u – зсув; σ – механічне напруження; D – індукція електричного поля; E – напруженість електричного поля; C_{33}^E – п'єзоконстанта, $C_{33}^E = 9,3 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$; e_{33} – п'єзоконстанта, $e_{33} = 14,9 \text{ Кл/м}^2$.

Розв'язання системи з цих чотирьох рівнянь було можливе за умови задання граничних умов, що описуються системою з трьох рівнянь [14]:

$$z = \pm l, \quad (4.26)$$

$$\sigma \pm z_a^{\pm} \frac{\partial u}{\partial t} = 0, \quad (4.27)$$

$$U_{BX} Y_E + S \frac{\partial D}{\partial t} = 0, \quad (4.28)$$

де z_a^+ і z_a^- – опори ультразвукових навантажень, прикладених відповідно до торців $z = +l$ і $z = -l$ п'єзокерамічного випромінювача 5; Y_E – провідність електричної сторони п'єзокерамічного випромінювача 5; S – площа поверхні п'єзокерамічного випромінювача 5; U_{BX} – електрична напруга, прикладена до п'єзокерамічного випромінювача 5.

Якщо до п'єзокерамічного випромінювача 5 прикладено електричну напругу U_{BX} , яка змінюється за гармонічним законом, то існує розв'язок, що описує амплітудно-частотну характеристику (АЧХ) і фазо-частотну характеристику (ФЧХ) п'єзокерамічного випромінювача 5 в режимі випромінювання, який використовувався для моделювання його роботи. Розв'язок має вигляд:

$$\sigma_{\text{ВИПР}}(U_{BX}) = -U_{BX} \frac{e_{33}}{2l} \frac{\alpha_a^+}{1 + \alpha_a^+} \frac{(1-a)(1-av^-)}{\Delta_0 - \Delta_l}. \quad (4.29)$$

Опис решти коефіцієнтів з формули (4.29) наведено в [14].

Залежність амплітуди ε_m відносної деформації, яка виникає в зразку з полікристалічного матеріалу 6 під дією гармонійної напруги на п'єзокерамічний випромінювач 5 U_{BX} з частотою f , показано на рис. 4.9.

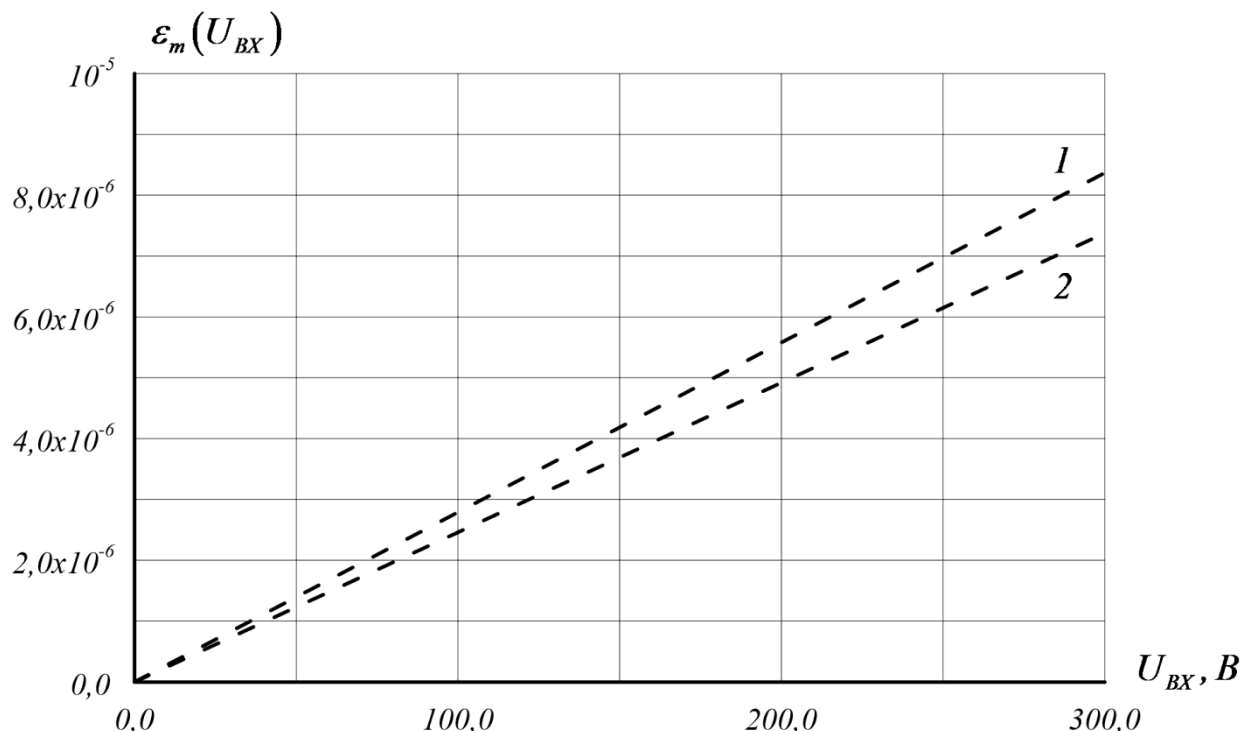


Рис. 4.9. Залежність між гармонійною напругою U_{BX} і амплітудою ε_m відносної деформації: 1) $f = 90 \text{ кГц}$; 2) $f = 290 \text{ кГц}$

Як видно з рис. 4.9, в зразку з полікристалічного матеріалу 6 було досягнуто амплітуди ε_m відносної деформації, що становить приблизно $8,4 \cdot 10^{-6}$, при цьому дійсне значення напруги U_{BX} на п'єзокерамічному випромінювачі 5 досягало $\approx 300 \text{ В}$ (відповідно, амплітудне значення $\approx 450 \text{ В}$).

Подавання напруги, що перевищує кілька сотень вольт, на п'єзокерамічний випромінювач 5 супроводжувалося певними складнощами, пов'язаними з тим, що за таких напруг електричне поле, прикладене до п'єзокерамічного випромінювача 5, ставало сильним, і рівняння п'єзоефекту набували нелінійного характеру. Це могло призвести до генерації п'єзокерамічним випромінювачем 5 власних нелінійних спотворень, які в рази перевищували нелінійні ультразвукові ефекти в зразку, виготовленому з полікристалічного матеріалу 6.

Електроультразвуковий режим роботи п'єзокерамічного приймача 7 в рамках математичної моделі, що відповідає поздовжнім товщинним коливанням елемента круглої форми (диска), поляризованого за товщиною, також описується системою з чотирьох рівнянь, яка включає в себе рівняння руху (4.22), рівняння прямого п'єзоефекту (4.23), рівняння зворотного п'єзоефекту (4.24) і рівняння електростатики (4.25).

Розв'язання системи з цих чотирьох рівнянь було можливе за умови задання граничних умов, що описуються системою з трьох рівнянь [14]:

$$z = \pm l, \quad (4.30)$$

$$\sigma \pm z_a^{\pm} \frac{\partial u}{\partial t} = \sigma_{PP}^{\pm}, \quad (4.31)$$

$$U_{ВИХ} Y_E + S \frac{\partial D}{\partial t} = 0, \quad (4.32)$$

де z_a^+ і z_a^- – опори ультразвукових навантажень, прикладених відповідно до торців $z = +l$ і $z = -l$ п'єзокерамічного приймача 7; $\sigma_{PP}^{\pm}$ – механічне напруження в прийнятій ультразвуковій хвилі; Y_E – провідність електричної сторони п'єзокерамічного приймача 7; S – площа поверхні п'єзокерамічного приймача 7; $U_{ВИХ}$ – електрична напруга, що знімається з п'єзокерамічного приймача 7.

Якщо до п'єзокерамічного приймача 7 прикладено механічне напруження σ_{PP} , яке змінюється за гармонічним законом, то існує розв'язок, що описує амплітудно-частотну і фазо-частотну характеристики п'єзокерамічного приймача 7 в режимі прийому, і яке також використовувалося для моделювання його роботи.

Розв'язок мав вигляд (розглядався лише односторонній прийом, коли $\sigma_{PP}^- = 0$):

$$U_{ВИХ}(\sigma_{PP}^+) = -\sigma_{PP}^+ \frac{e_{33} S_{II}}{2l} \frac{1 + \nu^+}{z_{II}} \frac{(1 - a)(1 - a\nu^-)}{(\Delta_0 - \Delta_l)(Y_E + Y_{II})}. \quad (4.33)$$

Повна провідність Y_{II} п'єзокерамічного приймача 7 визначалася за формулою

$$Y_{\Pi} = i\omega C_{\Pi} \frac{\Delta_0}{\Delta_0 - \Delta_1}, \quad (4.34)$$

де C_{Π} – ємність загальмованого п'єзокерамічного приймача 7 площею

$$S_{\Pi} = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,1416 \cdot (0,045 \text{ м})^2}{4} = 1,59 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2. \quad (4.35)$$

Опис решти коефіцієнтів з формули (4.33) також наведено в [14]. Провідність Y_E електричної сторони п'єзокерамічного приймача 7 визначалася як величина, обернена до опору Z_E електричної сторони п'єзокерамічного приймача 7 (для високочастотних п'єзожорстких мод):

$$Z_E = \frac{t}{i\omega\pi\left(\frac{d}{2}\right)^2 \varepsilon_{33}^S} \left(1 - k_t^2 \frac{\operatorname{tg}\left(\frac{1}{2}\omega t \sqrt{\frac{\rho}{c_{33}^D}}\right)}{\frac{1}{2}\omega t \sqrt{\frac{\rho}{c_{33}^D}}} \right), \quad (4.36)$$

де k_t – коефіцієнт електромеханічного зв'язку, $k_t = 0,44$.

Залежність напруги $U_{ВНХ}$, що виникає на обкладках п'єзокерамічного приймача 7 при дії на нього з боку зразка з полікристалічного матеріалу 6 пружної хвилі з амплітудою ε_m відносної деформації з частотою f , показано на рис. 4.10.

Ультразвукова хвиля в режимі випромінювання пакетів ультразвукових коливань з більшою і меншою амплітудами характеризувалася такими параметрами: центральною частотою f коливань, співвідношенням A_{MAX}/A_{MIN} амплітуди A_{MAX} більшого і амплітуди A_{MIN} меншого пакетів, кількістю N коливань в кожному з пакетів (яка для обох пакетів була однаковою).

Оскільки випромінювання пружної хвилі здійснювалося за рахунок комутації з частотою F пакетів коливань, випромінювання здійснювалося не на одній несучій частоті f (першій гармоніці), а у вигляді смуги $\pm\Delta f$ частот із центральною несучою частотою f . Зниженням частоти комутації F до значення $(5...20) \text{ Гц}$ вдавалося звузити смугу $\pm\Delta f$ частот відносно центральної не-

сучої частоти f (першої гармоніки). І навпаки, при підвищенні частоти кому-
тації F до значення $(20 \dots 200) \text{ Гц}$ смуга $\pm \Delta f$ частот розширювалася.

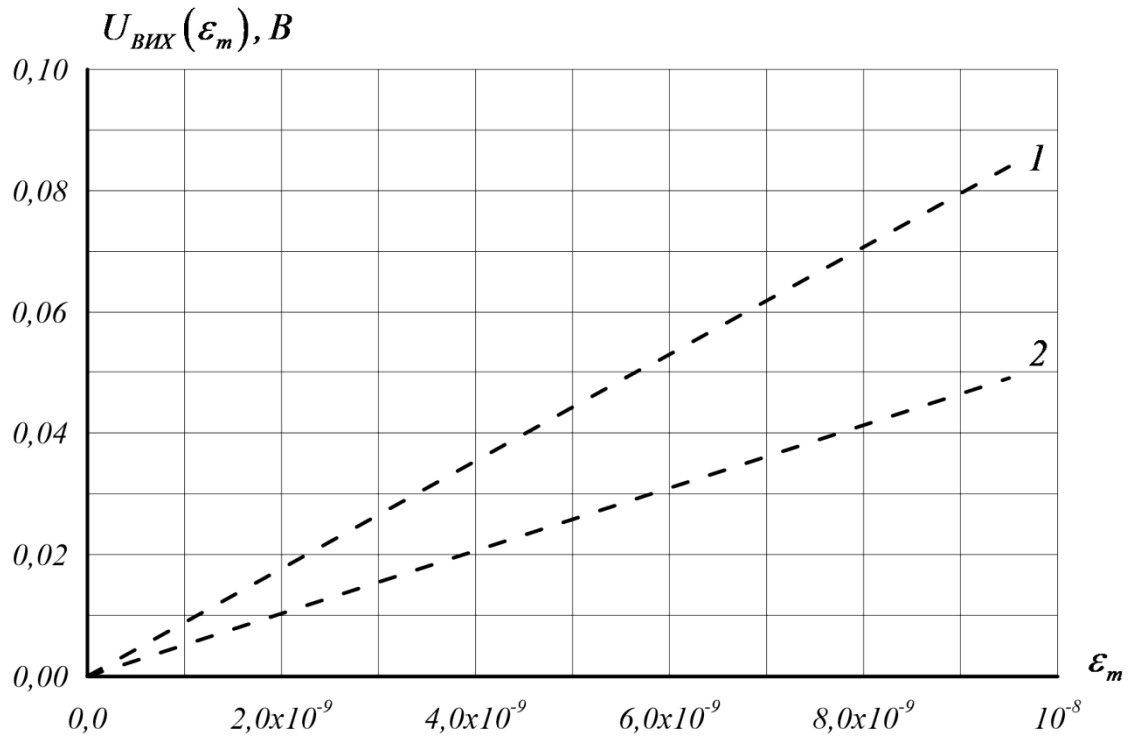


Рис. 4.10. Залежність між напругою $U_{вих}$ і амплітудою ε_m відносної деформації:

1) $f = 90 \text{ кГц}$; 2) $f = 290 \text{ кГц}$

Для визначення спектра функції $F(t)$ було виконано розкладання в ряд
Фур'є

$$F(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{i=1}^{\infty} \left(a_i \cos\left(\frac{\pi t}{T} i\right) + b_i \sin\left(\frac{\pi t}{T} i\right) \right), \quad (4.37)$$

де коефіцієнти a_i і b_i визначалися з відомих співвідношень

$$a_i = \frac{1}{T} \int_{-T}^{+T} F(t) \cos\left(\frac{\pi t}{T} i\right) dt \quad (i = 0, 1, 2, 3, \dots), \quad (4.38)$$

$$b_i = \frac{1}{T} \int_{-T}^{+T} F(t) \sin\left(\frac{\pi t}{T} i\right) dt \quad (i = 1, 2, 3, \dots). \quad (4.39)$$

Для визначення зміни спектра функції $F(t)$ розглядалися чотири значен-
ня співвідношень A_{MAX}/A_{MIN} ($10:1$, $20:1$, $50:1$ і $100:1$) і чотири значення кі-
лькості коливань N (20 , 50 , 100 і 200).

Результати (у відносних координатах) зміни спектра функції $F(t)$ при $N = 20$ і при $f = 90,0 \text{ кГц}$ (перший послідовний резонанс) представлено на рис. 4.11.

Встановлено, що амплітудний спектр $S(f)$ функції $F(t)$ є досить вузьким і при зміні співвідношення A_{MAX}/A_{MIN} практично не змінюється.

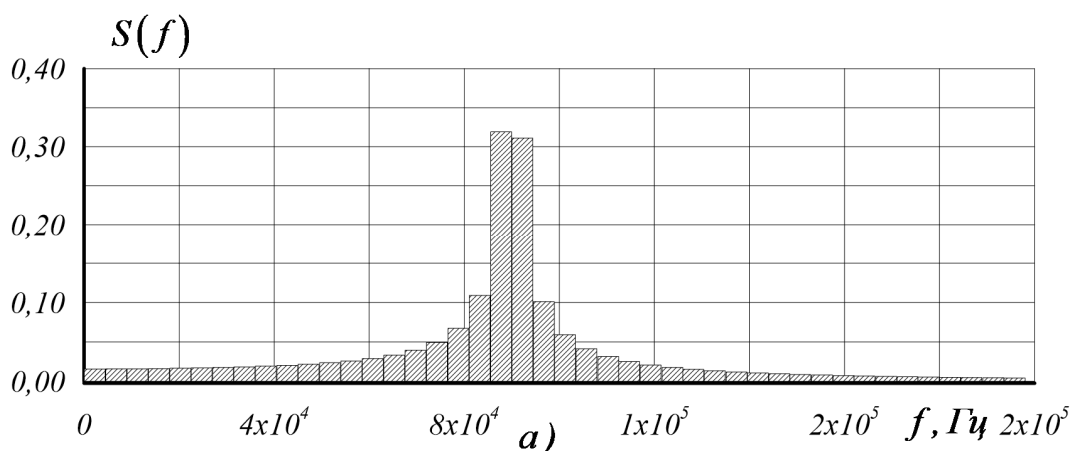
Енергетично майже весь сигнал зосереджено на основній частоті $f = 90,0 \text{ кГц}$ і її двох найближчих бокових гармоніках на частотах $f = 87,75 \text{ кГц}$ і $f = 92,25 \text{ кГц}$ – близько $(92,0 \dots 93,0)\%$ за потужністю. При інших значеннях N (у бік збільшення) смуга $\pm \Delta f$ частот звужується, а розподіл потужності між гармоніками суттєво не змінюється. Таким чином, найширша смуга резонансної кривої (при $N = 20$) становила $\pm \Delta f = \pm 2,25 \text{ кГц}$ при $f = 90,0 \text{ кГц}$.

Оскільки добротність п'єзокерамічного елементу Q пов'язана зі f і $\pm \Delta f$ співвідношенням

$$\left| \pm \frac{\Delta f}{f} \right| \approx \frac{1}{Q}, \quad (4.40)$$

то з цього співвідношення можна отримати, що

$$Q \approx \frac{90,0 \text{ кГц}}{2,25 \text{ кГц}} = 40. \quad (4.41)$$



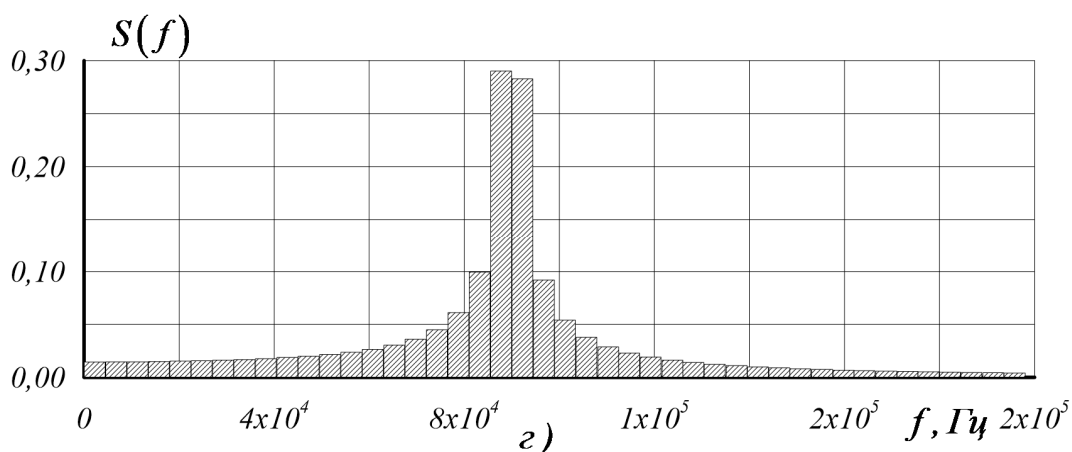
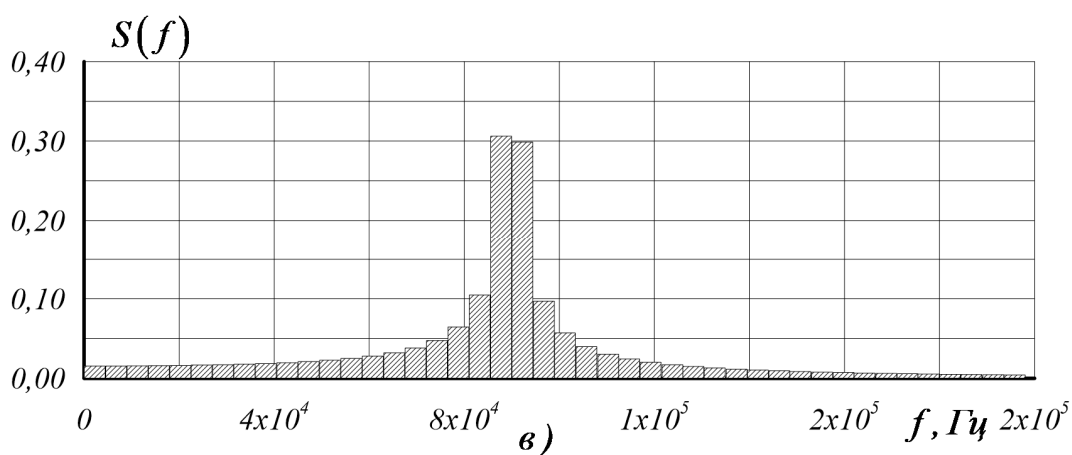
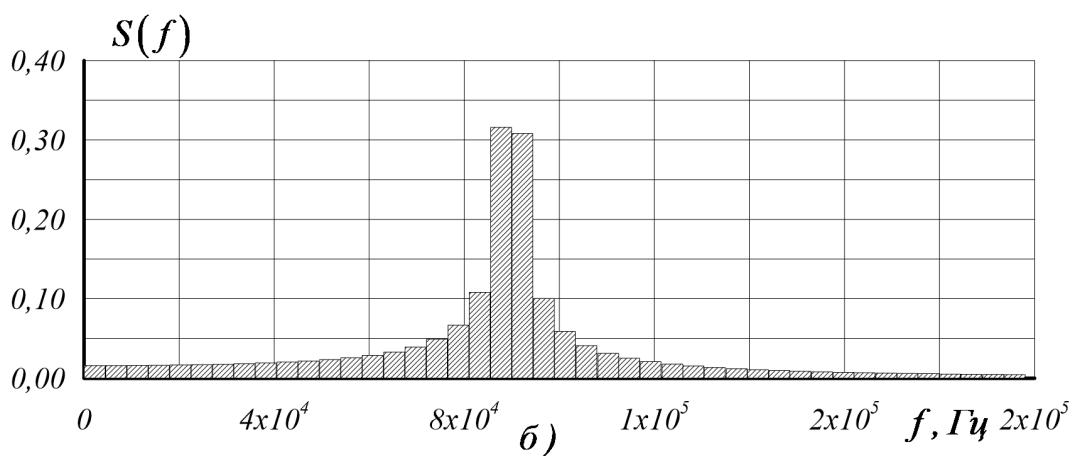


Рис. 4.11. Зміна спектра функції $F(t)$ при $N = 20$ при співвідношенні A_{MAX}/A_{MIN} :
а) $10 : 1$; б) $20 : 1$; в) $50 : 1$; г) $100 : 1$

Таким чином, для випромінювання в полікристалічний матеріал потрібно не менше $(92,0 \dots 93,0)\%$ потужності ультразвукової хвилі на центральній частоті $f = 90,0 \text{ кГц}$ із заданою смугою частот $\pm \Delta f = \pm 2,25 \text{ кГц}$ був необхідний п'єзокерамічний випромінювач 5 з добротністю Q приблизно 40, чому і відповідала п'єзокераміка ЦТС-19 з типовою добротністю $Q \approx 50$ [14].

Результати (у відносних координатах) зміни спектра функції $F(t)$ при $N = 20$ і при $f = 290,0 \text{ кГц}$ (другий послідовний резонанс) мали такий самий характер, як і для першого послідовного резонансу.

4.3. Оцінювання похибок вимірювального перетворення

Сумарна похибка δ_{Σ} неруйнівного ультразвукового вимірювального контролю межі міцності на розрив σ_B зразка з полікристалічного матеріалу 6 була функцією декількох змінних, оскільки на функцію вимірювального перетворення впливало багато факторів [15, 21]:

$$\delta_{\Sigma} = f(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n), \quad (4.42)$$

де δ_1 – похибка від впливу 1-го фактора; δ_2 – похибка від впливу 2-го фактора; δ_n – похибка від впливу n -го фактора.

В зв'язку з цим виникла необхідність виконати аналіз механізму виникнення похибок і зрозуміти причини їхньої появи, що дає можливість в подальшому звести вплив цих похибок до мінімуму. Проведений аналіз показав, що під час вимірювального перетворення виникали похибки таких видів:

1. Похибка δ_1 від нестабільності амплітуди генератора електричних коливань 1 і підсилювача потужності 4.

2. Похибка δ_2 від нестабільності формування пакетів коливань (під час випромінювання і приймання) дільників напруги 2 і 8, а також перемикачів 3 та 9.

3. Похибка δ_3 від нестабільності електроультразвукового перетворення (під час випромінювання і приймання) п'єзокерамічних випромінювача 5 і приймача 7.

4. Похибка δ_4 від нестабільності виділення постійної/змінної складових фазового детектора 11 і амплітудного детектора 12.

5. Похибка δ_5 від нестабільності аналого-цифрового перетворення вимірювальних приладів 13 і 14.

6. Похибка $\delta_{Д.В.Ф}$ від додаткових факторів впливу (неоднорідності властивостей п'єзокераміки, нестабільності опору і ємності з'єднувальних провідників і деяких інших).

Послідовність впливу кожної з наведених вище похибок на функцію вимірювального перетворення показано на рис. 4.12 [16–20].

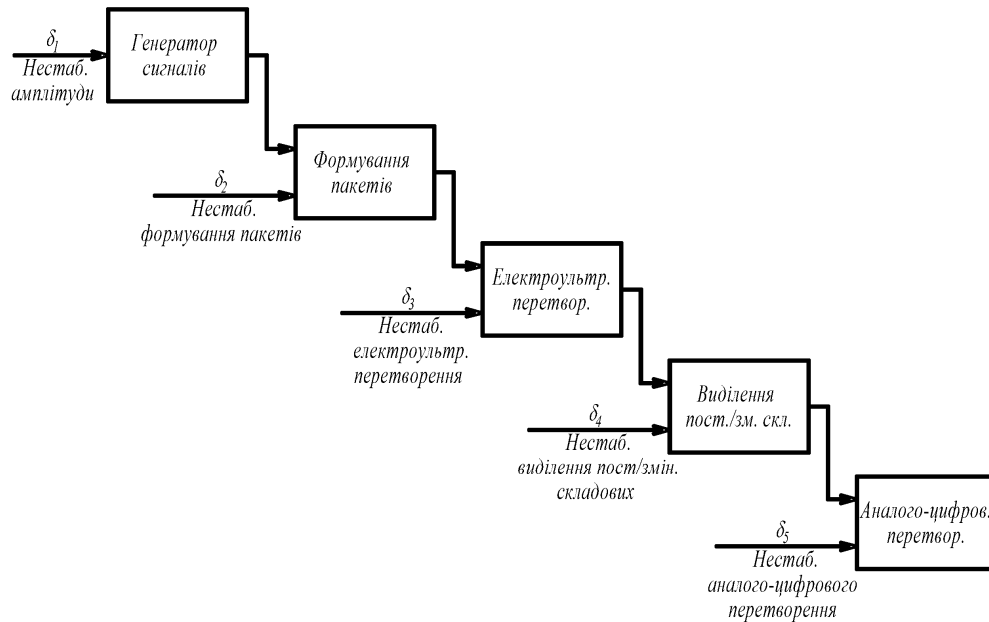


Рис. 4.12. Послідовність впливу похибок на функцію вимірювального перетворення

Виконаємо аналіз наведених вище похибок δ_1 , δ_2 , δ_3 , δ_4 , δ_5 і $\delta_{Д.В.Ф}$ залежно від їхнього виду.

Генератор сигналів складався з наступних блоків (рис. 4.13).

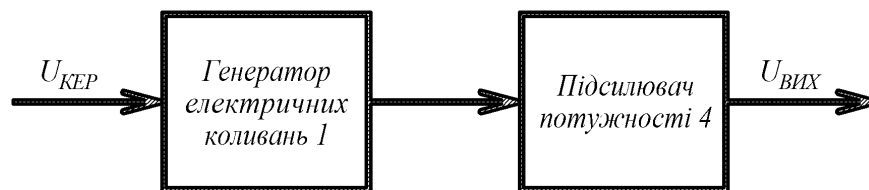


Рис. 4.13. Структурна схема генератора сигналів

Похибка δ_1 від нестабільності амплітуди генератора сигналів включала:

1. Похибка $\delta_{Г.Е.К}$ амплітуди генератора електричних коливань 1.
2. Похибка $\delta_{П.П}$ амплітуди підсилювача потужності 4.

Розглянемо ці похибки детальніше.

1. Як генератор електричних коливань 1 використовувався генератор ГЗ-

110, тому, згідно з технічним описом, нерівномірність рівня вихідної напруги сигналу генератора ГЗ-110 становила не більше $\pm 0,3\%$ в діапазоні частот від 100 Гц до 300 кГц за рівня побічних спектральних складових не більше -66 дБ . З урахуванням додаткових похибок, зумовлених зміною температури, напруги живлення і старінням електричних елементів, приймалося, що

$$\delta_{Г.Е.К} = 0,5\% . \quad (4.43)$$

2. Нерівномірність амплітудно-частотної характеристики підсилювача потужності 4 в частотному діапазоні від 100 Гц до 300 кГц складала приблизно $1,5\%$. Сюди входила похибка від частотної залежності вхідного і вихідного імпедансів підсилювача потужності 4 (приблизно $0,6\%$), похибка від падіння напруги на підвідних проводах (приблизно $0,2\%$), похибка від нерівномірного нагрівання транзисторів у вихідному каскаді підсилювача потужності 4 (приблизно $0,3\%$), похибка від частотної залежності коефіцієнтів передачі внутрішніх зворотних зв'язків підсилювача потужності 4 (приблизно $0,5\%$), похибка від виготовлення електронних компонентів із різними номіналами та від деяких інших похибок, внесок яких був незначним. Тому було прийнято, що

$$\delta_{П.П} = 1,5\% . \quad (4.44)$$

Оскільки похибки $\delta_{Г.Е.К}$ і $\delta_{П.П}$ між собою взаємно не корелюють, то похибка δ_I визначалася таким чином:

$$\delta_I = \sqrt{\delta_{Г.Е.К}^2 + \delta_{П.П}^2} = \sqrt{(0,5\%)^2 + (1,5\%)^2} = 1,60\% . \quad (4.45)$$

Похибка δ_2 від нестабільності формування пакетів коливань при випромінюванні і при прийманні включала:

1. Похибка $\delta_{Д.Н}$ коефіцієнта ділення дільників напруги 2 і 8.
2. Похибка $\delta_{К.Г}$ коефіцієнта передачі ключів перемикачів 3 і 9.

Розглянемо ці похибки детальніше.

1. На високих частотах ($> 10,0 \text{ кГц}$) коефіцієнт ділення $k_{Д}$ дільника (рис. 4.14) напруги визначався за формулою, яка враховувала не лише опори

резисторів $R1$ і $R2$, але і ємності коригувальних конденсаторів $C1$ і $C2$, а також індуктивності котушок індуктивності. Оскільки умову $R1/R2 = C1/C2 = L1/L2$ було виконано, то коефіцієнт ділення в основному визначався співвідношенням $k_D = R2/(R1 + R2)$. Оскільки похибки δ_{R1} і δ_{R2} , відповідно, резисторів $R1$ і $R2$ між собою взаємно не корелювали, то похибка $\delta_{Д.Н}$ визначалася наступним чином:

$$\delta_{Д.Н} = \frac{\Delta_{R2}}{R2} + \frac{\Delta_{R1+R2}}{R1 + R2}. \quad (4.46)$$

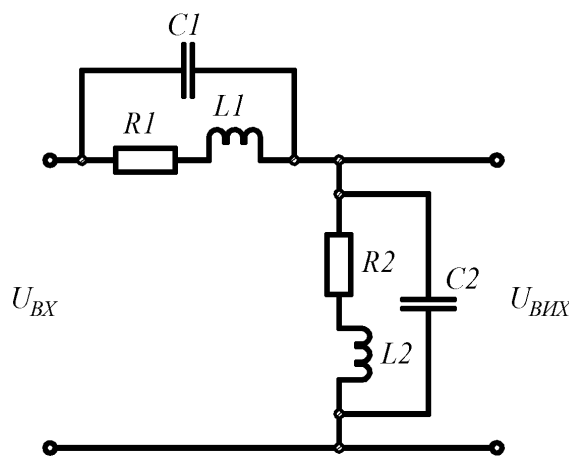


Рис. 4.14. Принципова схема дільника напруги для підвищених частот з урахуванням паразитних ємностей та індуктивностей

Розглянуто чотири варіанти визначення похибки $\delta_{Д.Н}$ залежно від співвідношення амплітуд A_{MAX}/A_{MIN} пакетів коливань в пружній хвилі для $A_{MAX} : A_{MIN} = 10 : 1$, $A_{MAX} : A_{MIN} = 20 : 1$, $A_{MAX} : A_{MIN} = 50 : 1$ і $A_{MAX} : A_{MIN} = 100 : 1$.

При $A_{MAX} : A_{MIN} = 10 : 1$ було отримано похибку коефіцієнта k_D ділення дільників напруги 2 і 8

$$\delta_{Д.Н} = \left(\frac{5,0 \text{ Ом}}{10^3 \text{ Ом}} + \frac{50,3 \text{ Ом}}{10^4 \text{ Ом} + 10^3 \text{ Ом}} \right) 100 \% = 0,96 \%. \quad (4.47)$$

При $A_{MAX} : A_{MIN} = 20 : 1$ було отримано похибку коефіцієнта k_D ділення дільників напруги 2 і 8

$$\delta_{Д.Н} = \left(\frac{5,0 \text{ Ом}}{10^3 \text{ Ом}} + \frac{100,1 \text{ Ом}}{2 \cdot 10^4 \text{ Ом} + 10^3 \text{ Ом}} \right) 100 \% = 0,98 \%. \quad (4.48)$$

При $A_{MAX} : A_{MIN} = 50 : 1$ було отримано похибку коефіцієнта k_d ділення дільників напруги 2 і 8

$$\delta_{d.H} = \left(\frac{5,0 \text{ Ом}}{10^3 \text{ Ом}} + \frac{250,0 \text{ Ом}}{5 \cdot 10^4 \text{ Ом} + 10^3 \text{ Ом}} \right) 100 \% = 0,99 \% . \quad (4.49)$$

При $A_{MAX} : A_{MIN} = 100 : 1$ було отримано похибку коефіцієнта k_d ділення дільників напруги 2 і 8

$$\delta_{d.H} = \left(\frac{5,0 \text{ Ом}}{10^3 \text{ Ом}} + \frac{500,0 \text{ Ом}}{10 \cdot 10^4 \text{ Ом} + 10^3 \text{ Ом}} \right) 100 \% = 1,00 \% . \quad (4.50)$$

Оскільки при $A_{MAX} : A_{MIN} = 100 : 1$ похибка $\delta_{d.H}$ досягала максимального значення, тому вважаємо, що

$$\delta_{d.H} = \pm 1,00 \% . \quad (4.51)$$

2. Як перемикачі 3 і 9 використовувалися інтегральні мікросхеми 590КН2. Згідно з технічним описом, їх можна було використовувати для комутації електричних ланцюгів постійного і змінного струму з частотою до 300 кГц . Проте на частотах, вищих за $10,0 \text{ кГц}$ виявлявся вплив як ємності (похибка приблизно $0,1\%$), так і індуктивності (похибка приблизно $0,05\%$) вхідних і вихідних ланцюгів інтегральних мікросхем 590КН2, тому було вирішено, що

$$\delta_{k.G} = \pm 0,2 \% . \quad (4.52)$$

Оскільки похибки $\delta_{d.H}$ і $\delta_{k.G}$ між собою взаємно не корелюють, то похибка δ_2 визначалася наступним чином:

$$\delta_2 = \sqrt{\delta_{d.H}^2 + \delta_{k.G}^2} = \sqrt{(1,0\%)^2 + (0,2\%)^2} = 1,02 \% . \quad (4.53)$$

Похибка δ_3 від нестабільності електроультразвукового перетворення під час випромінювання і приймання включала:

1. Похибка $\delta_{E.V}$ перетворення електричних коливань в ультразвукові коливання за допомогою п'єзокерамічного випромінювача 5.

2. Похибка $\delta_{V.E}$ перетворення ультразвукових коливань в електричні коливання за допомогою п'єзокерамічного приймача 7.

Розглянемо ці похибки детальніше.

1. Під час перетворення електричних коливань в ультразвукові коливання відбувається складний процес перетворення електричної енергії на механічну, який у загальному випадку характеризується кількома коефіцієнтами електро-механічного зв'язку. Як також було показано вище, пружні константи п'єзокерамічних перетворювачів можуть відрізнятися від довідкових значень на $\pm 5\%$, п'єзоелектричні константи — на $\pm 10\%$, діелектричні константи — на $\pm 20\%$. Також відомо, що п'єзокерамічні перетворювачі характеризуються дисипацією енергії в матеріалі і власними ультразвуковими нелінійними спотвореннями.

Однак, внаслідок того, що ультразвукова хвиля випромінювалася в зразок з полікристалічного матеріалу 6 у вигляді пакетів коливань із заданим співвідношенням амплітуд з подальшим вирівнюванням прийнятих пакетів за амплітудою в ту ж саму кількість разів, багато з наведених вище похибок взаємно компенсувалися або їхня дія зводилася до мінімуму. Тому приймалося, що

$$\delta_{E.V} = \pm 2,0\% . \quad (4.54)$$

2. При перетворенні ультразвукових коливань на електричні коливання також відбувається складний процес перетворення механічної енергії на електричну, аналогічний розглянутому вище. Тому вважаємо, що

$$\delta_{V.E} = \pm 2,0\% . \quad (4.55)$$

Оскільки похибки $\delta_{E.V}$ і $\delta_{V.E}$ між собою взаємно не корелюють, то похибка δ_3 визначалася наступним чином [21]:

$$\delta_3 = \sqrt{\delta_{E.V}^2 + \delta_{V.E}^2} = \sqrt{(2,0\%)^2 + (2,0\%)^2} \approx 2,80\% . \quad (4.56)$$

Похибка δ_4 від нестабільності виділення постійної/змінної складових включала:

1. Похибку $\delta_{C.D}$ коефіцієнта передачі селективного підсилювача 10.
2. Похибка $\delta_{\Phi.A.D}$ коефіцієнт передачі фазового детектора 11/амплітудного детектора 12.

Розглянемо ці похибки детальніше.

1. Селективний підсилювач 10 вносив мінімальні амплітудні спотворення, що було пов'язано з його відносно невеликим коефіцієнтом підсилення, який мав значення $20 \dots 100$. Оскільки підсилення відбувалося в діапазоні частот до 300 кГц , а ширина смуги частот становила не більше $(5 \dots 10) \text{ кГц}$, то селективний підсилювач 10 вносив також мінімальні фазові спотворення.

Завдяки застосуванню дільників напруги 2 і 8, а також перемикачів 3 і 9, що працюють синхронно і протифазно, рівень сигналу на вході селективного підсилювача 10 змінювався лише в незначних межах – внаслідок цього селективний підсилювач 10 вносив мінімальні нелінійні спотворення. Тому приймаємо, що

$$\delta_{с.п} = \pm 0,15 \%. \quad (4.57)$$

2. Фазовий детектор 11 і амплітудний детектор 12 в діапазоні частот до 300 кГц за ширини смуги частот не більше ніж $(5 \dots 10) \text{ кГц}$ також вносив мінімальні фазові/амплітудні та нелінійні спотворення. Тому приймаємо, що

$$\delta_{\phi.а.д} = 0,5 \%. \quad (4.58)$$

Оскільки похибки $\delta_{с.п}$ і $\delta_{\phi.а.д}$ між собою взаємно не корелюють, то похибка δ_4 визначалася наступним чином [21]:

$$\delta_4 = \sqrt{\delta_{с.п}^2 + \delta_{\phi.а.д}^2} = \sqrt{(0,15 \%)^2 + (0,5 \%)^2} = 0,52 \%. \quad (4.59)$$

Похибка δ_5 від нестабільності аналого-цифрового перетворення включала:

1. Похибка $\delta_{а.п}$ аналогового представлення (квантування за рівнем).
2. Похибка $\delta_{д.о.н}$ джерела опорної напруги.
3. Похибка $\delta_{I.ацп}$ інструментальна аналого-цифрового перетворювача.

Розглянемо ці похибки детальніше.

1. Аналого-цифровий перетворювач модуля Е20-10 вимірювальних приладів 13 і 14 перетворював аналоговий вхідний сигнал на цифровий вихідний сигнал. Процес аналого-цифрового перетворення не був ідеальним, і на нього

впливав як технологічний розкид параметрів електронних компонентів, що входять до складу модуля E20-10, так і вплив різних внутрішніх і зовнішніх електромагнітних завад. Однією з найбільш значущих похибок при використанні аналого-цифрового перетворення була похибка аналогового представлення $\delta_{A.П}$, пов'язана з квантуванням за рівнем (похибка одного відліку). Похибку $\delta_{A.П}$ принципово не можна було усунути, оскільки вона була невід'ємною частиною процесу аналого-цифрового перетворення. Похибку $\delta_{A.П}$ аналогового представлення (квантування за рівнем) за великої кількості рівнів квантування аналого-цифрового перетворювача (14 розрядів для модуля E20-10 є великою кількістю) описувалося прямокутним законом розподілу, що відповідало рівномірній щільності імовірності знаходження квантованого аналогового сигналу в діапазоні від $-0,5h_K$ до $+0,5h_K$:

$$\delta_{A.П} = 0,5h_K 100\%, \quad (4.60)$$

де h_K – крок квантування.

Оскільки аналого-цифровий перетворювач модуля E20-10 мав рівномірну розрядну сітку, значення кроку h_K квантування було жорстко прив'язане до кількості $N_{АЦП}$ розрядів аналого-цифрового перетворювача і піддіапазону $U_{ВХ.АЦП}$ вхідної напруги. Оскільки звичайно використовувався піддіапазон вхідної напруги, $U_{ВХ.АЦП} = \pm 1,0 \text{ В}$ і $N_{АЦП} = 14$, то крок квантування становив

$$h_K = \frac{|U_{ВХ.АЦП}|}{2^{N_{АЦП}}} = \frac{|\pm 1,0 \text{ В}|}{2^{14}} \approx 0,000061 \text{ В}, \quad (4.61)$$

звідки випливало, що

$$\delta_{A.П} = 0,5 \frac{|U_{ВХ.АЦП}|}{2^{N_{АЦП}}} = 0,5 \frac{|\pm 1,0 \text{ В}|}{2^{14}} \cdot 100\% = 0,003\%. \quad (4.62)$$

2. Похибка $\delta_{Д.О.Н}$ джерела опорної напруги була пов'язана, в основному, з температурною нестабільністю стабілітронів, які входять до складу джерела опорної напруги. Передбачалося, що робочий температурний діапазон експериментальної установки становить від -10 до $+50^\circ\text{C}$. Тобто, температурний

перепад становив

$$+50^{\circ}\text{C} - (-10^{\circ}\text{C}) = 60^{\circ}\text{C}. \quad (4.63)$$

В модулі E20-10 використовувалися стабілітрони типу КС191Ф, які мали коефіцієнт температурної нестабільності напруги не гірший, ніж $\pm 0,005\%/^{\circ}\text{C}$.

Тому було визначено, що похибка

$$\delta_{\text{д.о.н}} = \pm 0,005 \frac{\%}{^{\circ}\text{C}} \cdot 60^{\circ}\text{C} = \pm 0,3\%. \quad (4.64)$$

3. Інструментальна похибка $\delta_{\text{І.АЦП}}$ зумовлювалася неідеальністю електронних компонентів, з яких складався аналого-цифровий перетворювач; наявністю шумів у вхідному сигналі та у внутрішніх компонентах аналого-цифрового перетворювача; наявністю електромагнітних завад, наведених на внутрішні компоненти аналого-цифрового перетворювача і таке інше. Виникнення інструментальної похибки $\delta_{\text{І.АЦП}}$ зумовлювалося впливом великої кількості випадкових факторів, і її закон розподілу наближався до нормального (розподілу Гаусса).

В сучасних аналого-цифрових перетворювачах інструментальна похибка $\delta_{\text{І.АЦП}}$ є несуттєвою. Наприклад, для зменшення похибки $\delta_{\text{І.АЦП}}$ інструментальної в модулі E20-10 використовувалися: вхідні буферні підсилювачі, активні фільтри нижніх частот 3-го порядку, різноманітні режими синхронізації, процедура калібрування даних апаратними засобами ПЛІС, завдання струму зсуву для входу аналого-цифрового перетворювача тощо. Похибкою $\delta_{\text{І.АЦП}}$ інструментальною похибкою в загальному випадку можна було знехтувати, тому було прийнято, що

$$\delta_{\text{І.АЦП}} = \pm 0,01\%. \quad (4.65)$$

Оскільки похибки $\delta_{\text{А.П}}$, $\delta_{\text{д.о.н}}$ і $\delta_{\text{І.АЦП}}$ між собою взаємно корельовані, то виникає похибка δ_5 визначалася наступним чином [21]:

$$\delta_5 = \delta_{\text{А.П}} + \delta_{\text{д.о.н}} + \delta_{\text{І.АЦП}} = 0,003\% + 0,3\% + 0,01\% = 0,3\%. \quad (4.66)$$

Серед похибок різноманітного походження, які впливали на похибку ви-

мірювального перетворення (при цьому домінуючі серед них визначити було неможливо), можна виділити такі: неоднорідність фізико-механічних властивостей п'єзокерамічних матеріалів п'єзокерамічного випромінювача 5 і п'єзокерамічного приймача 7; робота п'єзокерамічного випромінювача 5 і п'єзокерамічного приймача 7 в області ультразвукової нелінійності п'єзокерамічних матеріалів (великі механічні напруження, сильні електричні поля); неякісна обробка торців зразка з полікристалічного матеріалу 6; забруднення торців п'єзокерамічного випромінювача 5 і п'єзокерамічного приймача 7, а також торців зразка з полікристалічного матеріалу 6; вплив опору і ємності з'єднувальних провідників; вплив зовнішніх електричних і магнітних полів; вплив вібрації і ударних впливів. Відповідно до центральної граничної теореми, коли кількість додаткових факторів впливу (незалежних один від одного) велика, застосовується нормальний закон розподілу похибки вимірювання, зумовленої цими додатковими факторами впливу, що має нульове математичне сподівання:

$$p_{Д.В.Ф}(\delta) = \frac{1}{\sigma_{Д.В.Ф} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma_{Д.В.Ф}^2}}, \quad (4.67)$$

де δ – похибка, зумовлена додатковими факторами впливу; $\sigma_{Д.В.Ф}$ – середньоквадратичне відхилення похибки δ .

В результаті аналізу механізму виникнення похибок було розглянуто конкретні їх види і визначено відповідні закони розподілу помилок вимірювання.

1. Для похибки δ_1 амплітуди генератора сигналів нормальний закон розподілу похибки вимірювання мав вигляд:

$$p_1(\delta) = \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma_1^2}}, \quad (4.68)$$

де σ_1 – середньоквадратичне відхилення похибки δ_1 .

2. Для похибки δ_2 формування пакетів коливань під час випромінювання і приймання нормальний закон розподілу похибки вимірювання мав вигляд:

$$p_2(\delta) = \frac{1}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma_2^2}}, \quad (4.69)$$

де σ_2 – середньоквадратичне відхилення похибки δ_2 .

3. Для похибки δ_3 електроультразвукового перетворення при випромінюванні і при прийманні нормальний закон розподілу похибки вимірювання мав такий вигляд:

$$p_3(\delta) = \frac{1}{\sigma_3 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma_3^2}}, \quad (4.70)$$

де σ_3 – середньоквадратичне відхилення похибки δ_3 .

4. Для похибки δ_4 виділення постійної/змінної складових нормальний закон розподілу похибки вимірювання мав такий вигляд:

$$p_4(\delta) = \frac{1}{\sigma_4 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma_4^2}}, \quad (4.71)$$

де σ_4 – середньоквадратичне відхилення похибки δ_4 .

5. Для похибки δ_5 аналого-цифрового перетворення рівномірний закон розподілу похибки вимірювання мав такий вигляд:

$$p_5(\delta) = \frac{1}{h_K} = \frac{2^{N_{\text{АЦП}}}}{|U_{\text{ВХ.АЦП}}|}, \delta \in \left[-\frac{U_{\text{ВХ.АЦП}}}{2 \cdot 2^{N_{\text{АЦП}}}}, +\frac{U_{\text{ВХ.АЦП}}}{2 \cdot 2^{N_{\text{АЦП}}}} \right]. \quad (4.72)$$

6. Для похибки $\delta_{\text{Д.В.Ф}}$ від додаткових впливових факторів закон розподілу похибки вимірювання мав вигляд (4.67). При цьому значення середньоквадратичних відхилень становили σ_1 , σ_2 , σ_3 і σ_4 було отримано в результаті аналізу значень похибок δ_1 , δ_2 , δ_3 і δ_4 . Було встановлено, що

$$\sigma_1 = 1,2 \dots 1,3, \quad \sigma_2 = 0,45 \dots 0,55, \quad \sigma_3 = 1,4 \dots 1,5, \quad \sigma_4 = 0,3 \dots 0,4. \quad (4.73)$$

Закон розподілу сумарної похибки $p_{\Sigma}(\delta)$ ультразвукового нелінійного контролю міцності зразка з полікристалічного матеріалу 6 був композицією законів розподілу $p_1(\delta)$, $p_2(\delta)$, $p_3(\delta)$, $p_4(\delta)$, $p_5(\delta)$ і $p_{\text{Д.В.Ф}}(\delta)$. Він визначався на основі згортки законів розподілу за загальною формулою:

$$p(y) = \int_{-\infty}^{+\infty} p_1(y-x)p_2(x)dx, \quad (4.74)$$

де $p(y)$ – результуючий закон розподілу; $p_1(x)$, $p_2(x)$ – початкові закони розподілу.

Оскільки закони розподілу $p_1(\delta)$, $p_2(\delta)$, $p_3(\delta)$ і $p_4(\delta)$ були нормальними, то в результаті їх композиції за формулою (4.74) також було отримано нормальний закон розподілу похибки δ_{l-4} , який мав вигляд:

$$p_{l-4}(\delta) = \frac{1}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\delta^2}{2(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2)}}. \quad (4.75)$$

Композиція рівномірного закону розподілу $p_5(\delta)$ і нормального закону розподілу $p_{l-4}(\delta)$ відповідно до рекомендацій [21] визначалася таким чином:

$$p_{l-5}(\delta_{l-5}) = \int_{-\infty}^{+\infty} p_{l-4}(\delta_{l-5} - \delta) p_5(\delta) d\delta. \quad (4.76)$$

Закон розподілу сумарної похибки $p_\Sigma(\delta)$ визначалася як композиція нормального закону розподілу $p_{l-5}(\delta)$ і нормального закону розподілу $p_{Д.В.Ф}(\delta)$:

$$p_\Sigma(\delta_\Sigma) = \int_{-\infty}^{+\infty} p_{l-5}(\delta_\Sigma - \delta) p_{Д.В.Ф}(\delta) d\delta. \quad (4.77)$$

В нормальному законі розподілу $p_{Д.В.Ф}(\delta)$ (4.67) невідомим параметром було $\sigma_{Д.В.Ф}$, оскільки кількість додаткових факторів впливу (незалежних один від одного) досить велика, і врахувати вплив їх усіх неможливо.

Тому було розглянуто три випадки співвідношення між середньоквадратичним відхиленням відомого закону розподілу $p_{l-5}(\delta)$ і середньоквадратичним відхиленням невідомого закону розподілу $p_{Д.В.Ф}(\delta)$ (рис. 4.15).

Оскільки обчислення за формулами (4.76) і (4.77) були досить складними, то для обчислень використовували математичний пакет MatLab.

Кількісною оцінкою достовірності вимірювального контролю межі міцності на розрив полікристалічних матеріалів була імовірність того, що резуль-

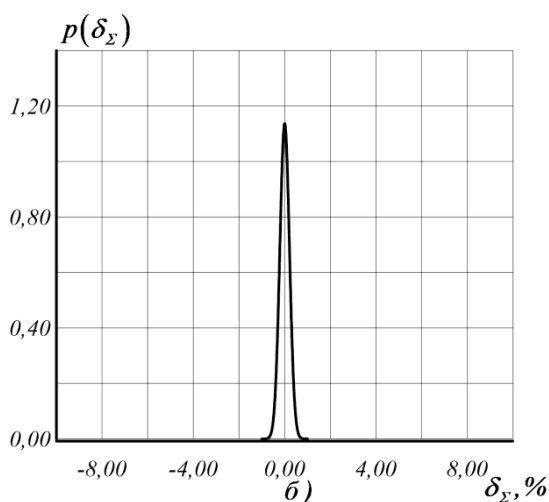
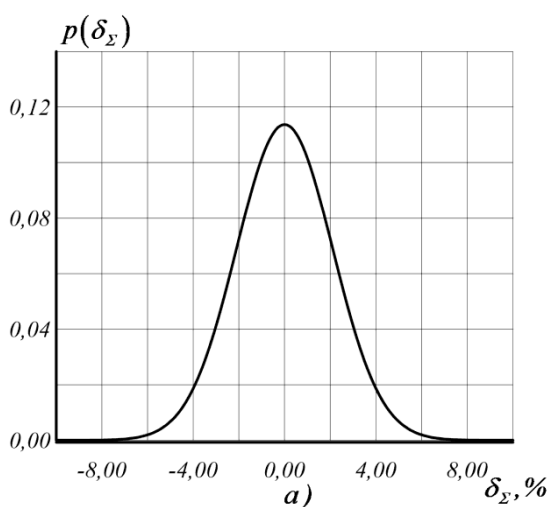
тат вимірювання відповідає дійсному значенню межі міцності на розрив σ_B зразка з полікристалічного матеріалу 6. В загальному вигляді, достовірність $D_{ВИМ}$ вимірювання визначалася за формулою [21]

$$D_{ВИМ} = 1 - P_{ПОМ} , \quad (4.78)$$

де $P_{ПОМ}$ – імовірність помилкових вимірювань, яку можна представити у вигляді двох складових:

$$P_{ПОМ} = P_{ПОМ(1)} + P_{ПОМ(2)} , \quad (4.79)$$

де $P_{ПОМ(1)}$ – імовірність того, що отримане значення міцності на розрив σ_B зразка з полікристалічного матеріалу 6 близьке до дійсного значення, а результат вимірювання – невірний (помилка першого роду); $P_{ПОМ(2)}$ – імовірність того, що отримане значення міцності на розрив σ_B не відповідає дійсному значенню, а результат вимірювання є вірним (помилка другого роду).



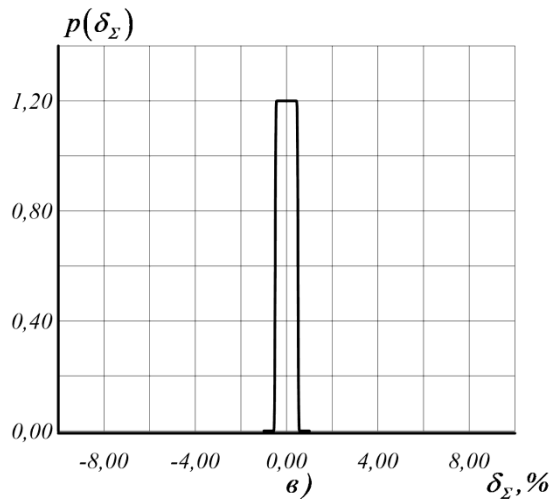


Рис. 4.15. Закон розподілу сумарної похибки $p(\delta_\Sigma)$: а) $\sigma_{Д.В.Ф} \gg \sigma_{I-5}$; б) $\sigma_{Д.В.Ф} \approx \sigma_{I-5}$;
в) $\sigma_{Д.В.Ф} \ll \sigma_{I-5}$

Імовірність помилок $P_{ПОМ(1)}$ першого роду можна було визначити за формулою [15]:

$$P_{ПОМ(1)} = \int_{a_1}^{b_1} F(x) dx \int_{-\infty}^{c_1} F(\Delta) d\Delta + \int_{a_1}^{b_1} F(x) dx \int_{d_1}^{+\infty} F(\Delta) d\Delta, \quad (4.80)$$

де $F(x)$ – функція розподілу вимірюваної величини; $[a_1; b_1]$ – межі інтервалу, в якому існує імовірність помилкових вимірювань першого роду; $F(\Delta)$ – функція розподілу похибки засобу вимірювання; $[-\infty; c_1]$, $[d_1; +\infty]$ – межі інтервалів, в яких похибки засобу вимірювання не перешкоджають виникненню помилки $P_{ПОМ(1)}$ першого роду.

Імовірність помилок $P_{ПОМ(2)}$ другого роду також можна розрахувати за формулою:

$$P_{ПОМ(2)} = \int_{a_2}^{b_2} F(x) dx \int_{-\infty}^{c_2} F(\Delta) d\Delta + \int_{a_2}^{b_2} F(x) dx \int_{d_2}^{+\infty} F(\Delta) d\Delta, \quad (4.81)$$

де $F(x)$ – функція розподілу вимірюваної величини; $[a_2; b_2]$ – межі інтервалу, в якому існує імовірність помилкових вимірювань другого роду; $F(\Delta)$ – функція розподілу похибки засобу вимірювання; $[-\infty; c_2]$, $[d_2; +\infty]$ – межі інтервалів, в яких похибки засобу вимірювання не перешкоджають виникненню помилки

$P_{\text{ПОМ}(2)}$ другого роду.

Таким чином, в результаті проведеної оцінки достовірності вимірювального контролю межі міцності на розрив σ_B для полікристалічного матеріалу 6 було отримано залежності $P_{\text{ПОМ}(1)}$ і $P_{\text{ПОМ}(2)}$ (рис. 4.16).

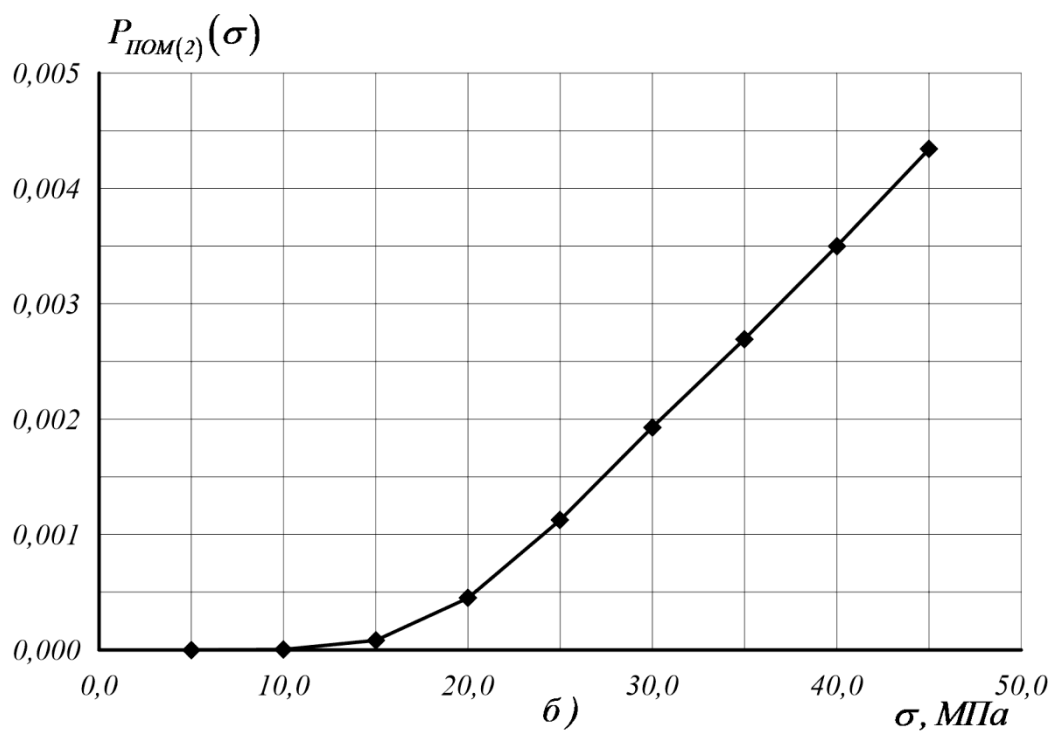
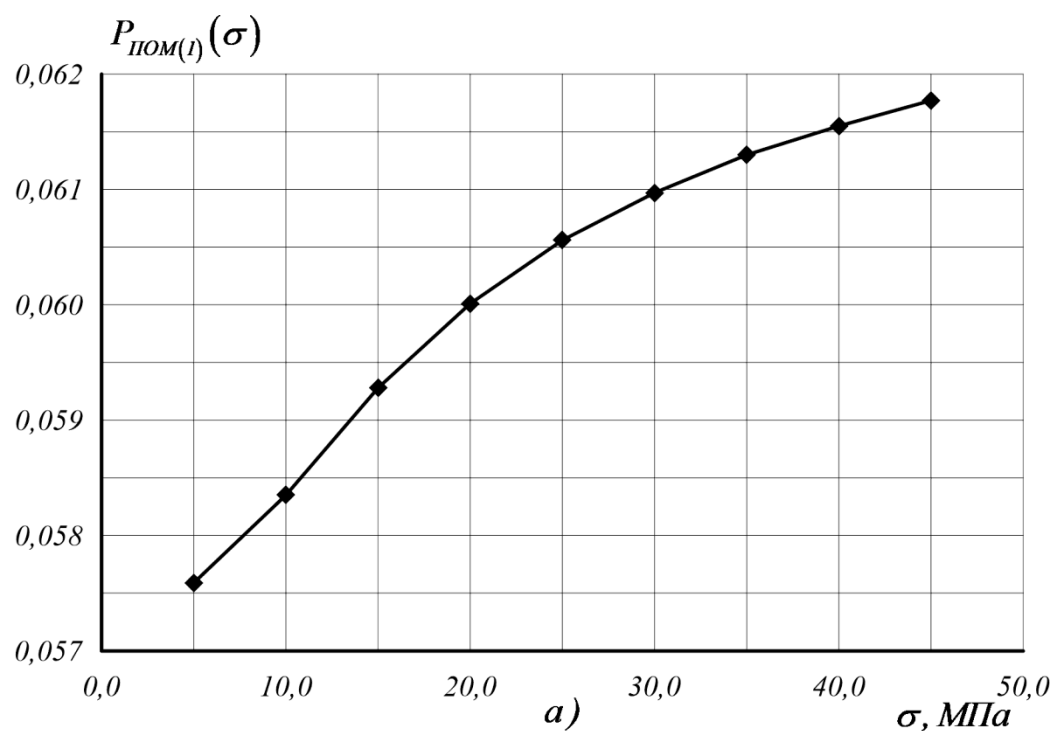


Рис. 4.16. Залежність похибки: а) першого роду; б) другого роду

4.4. Результати вимірювального контролю межі міцності на розрив σ_B полікристалічних матеріалів

Методика вимірювання параметрів $\Delta c/c$ і $\Delta K/K$ ультразвукової хвилі передбачає використання експериментальної установки (рис. 4.1). Для проведення вимірювань необхідно підготувати зразок з полікристалічного матеріалу 6 і виконати вимірювання згідно з порядком, наведеним нижче.

1. Зразок із полікристалічного матеріалу 6 очистити від бруду, пилу і сторонніх речовин, за необхідності виконати шліфування торців для забезпечення непаралельності не більше $(2...3)^\circ$ і шорсткості не гіршої ніж $Rz\ 25...Rz\ 32$.

2. Розмістити контрольований зразок разом з елементами кріплення на масивній антивібраційній горизонтальній поверхні. Нанести на торці зразка контактну пасту, аналогічну SonoGlide або Ultragel II.

3. Проведення вимірювань забороняється за умов порушень електричної безпеки, температурного і вологісного режимів, підвищеного рівня вібрацій, підвищеного вмісту пилу в повітрі тощо.

4. Увімкнути живлення засобів вимірювання: експериментальної установки (рис. 4.1), генератора сигналів ГЗ-110, вимірювального модуля E20-10 тощо. Дати їм прогрітися протягом мінімум 15 хв.

5. Під'єднати п'єзокерамічний випромінювач 5 до одного з торців зразка з полікристалічного матеріалу 6, а ультразвуковий приймач 7 – до іншого торця зразка 6.

6. Подати на п'єзокерамічний випромінювач 5 пакети електричних коливань із заданим співвідношенням амплітуд. Прийняти з ультразвукового приймача 7 пакети електричних коливань, вирівняні за амплітудою в ту саму кількість разів.

7. Виділити з прийнятих пакетів електричних коливань за допомогою фазового детектора 11 або амплітудного детектора 12 постійну/змінну складові, функціонально пов'язані зі зміною $\Delta c/c$ і $\Delta K/K$.

8. Виконати вимірювання постійної/змінної складових з метою подаль-

шого визначення $\Delta c/c$ і $\Delta K/K$ за функціональними залежностями.

Вимірювання межі міцності на розтяг σ_B полікристалічного матеріалу згідно з ГОСТ 1497-84 “Метали. Методи випробувань на розтяг” передбачає використання розривної машини УМ-5 (рис. 4.17) з верхньою межею навантаження 50 кН і межею допустимої систематичної похибки, що не перевищує 1% відсотка від вимірюваного навантаження. Для проведення вимірювань необхідно підготувати зразок з полікристалічного матеріалу 6, після чого виконати вимірювання згідно з порядком, наведеним нижче.

1. Зразок з полікристалічного матеріалу 6 слід підготувати таким чином (наприклад, шляхом сточування частини матеріалу і формування на зразку 6 виступів необхідного розміру), щоб його було зручно закріплювати в захватах розривної машини.



Рис. 4.17. Розривна машина УМ-5

2. Застосувати до зразка 6 поступово зростаюче розривне зусилля до моменту руйнування зразка 6.

3. За результатами руйнування зразка 6 визначити межу міцності на розрив σ_B полікристалічного матеріалу.

Контроль міцності конструкційних полікристалічних матеріалів передбачає їхнє сортування за критерієм “придатний-непридатний”. Основним показником у цьому критерії є значення межі міцності на розрив σ_B , яке отримують з виразів (2.39) і (2.40).

За заданих значень амплітуди відносної деформації ε_m , температури T полікристалічного матеріалу і частоти f пружної хвилі визначаються значення зміни $\Delta c/c$ фазової швидкості і зміни $\Delta K/K$ коефіцієнта поглинання, перевищення яких відповідає зниженню межі міцності на розрив σ_B нижче необхідного значення.

В табл. 4.1 наведено результати вимірювання межі міцності на розрив σ_B для латуні ЛС59-1 за використання наступних підходів до неруйнівного і руйнівного вимірювального контролю.

1. В графі 2 табл. 4.1 і табл. 4.2 наведено результати вимірювань параметра σ_B , виконані на розривній машині УМ-5, які вважаються еталонними.

2. В графах 3, 4, 5 і 6 табл. 4.1 наведено результати вимірювань параметра σ_B за допомогою запропонованого неруйнівного ультразвукового вимірювального контролю за зміною $\Delta c/c$ фазової швидкості c пружної хвилі з подальшими розрахунками за формулою (2.64), а в графах 3, 4, 5 і 6 табл. 4.2 наведено результати вимірювання параметра σ_B за допомогою запропонованого неруйнівного ультразвукового вимірювального контролю за зміною $\Delta K/K$ коефіцієнта поглинання K пружної хвилі з подальшими розрахунками за формулою (2.65).

3. В графі 7 табл. 4.1 наведено результати вимірювань параметра σ_B за допомогою ультразвукового приладу УК-10П за зміною часового інтервалу (похибка вимірювання $\pm 0,5\%$) з подальшими розрахунками за емпіричними формулами, а в графі 7 табл. 4.2 наведено результати вимірювання параметра σ_B за допомогою ультразвукового приладу УК-10П за зміною амплітуди першої напівхвилі (похибка вимірювання $\pm 20,0\%$) також з подальшими розрахунками за емпіричними формулами.

Порівняння результатів вимірювань межі міцності на розрив σ_B свідчить про наступне.

Табл. 4.1. Результати вимірювання параметра σ_B для латуні ЛС59-1 за зміною параметра $\Delta c/c$

№ п/п	Межа міцності на розрив σ_B , МПа					
	Розривна машина УМ-5	Неруйнівні методи				
		За зміною параметра $\Delta c/c$				Прилад ультразвуковий УК-10П
		$\varepsilon_m=0,1 \cdot 10^{-5}$	$\varepsilon_m=0,2 \cdot 10^{-5}$	$\varepsilon_m=0,5 \cdot 10^{-5}$	$\varepsilon_m=1,0 \cdot 10^{-5}$	
1	2	3	4	5	6	7
1	340,0 (м'який)	342,2	338,3	339,8	344,3	337,5
2	430,0 (напівтвердий)	436,5	430,5	435,5	428,0	402,3
3	490,0 (напівтвердий)	492,3	498,1	478,6	505,0	510,5
4	570,0 (твердий)	557,2	557,9	556,9	557,3	571,6

Табл. 4.2. Результати вимірювання параметра σ_B для латуні ЛС59-1 за зміною параметра $\Delta K/K$.

№ п/п	Межа міцності на розрив σ_B , МПа					
	Розривна машина УМ-5	Неруйнівні методи				
		За зміною параметра $\Delta K/K$				Прилад ультразвуковий УК-10П
		$\varepsilon_m=0,1 \cdot 10^{-5}$	$\varepsilon_m=0,2 \cdot 10^{-5}$	$\varepsilon_m=0,5 \cdot 10^{-5}$	$\varepsilon_m=1,0 \cdot 10^{-5}$	
1	2	3	4	5	6	7
1	340,0 (м'який)	350,3	333,3	326,0	339,6	358,8
2	430,0 (напівтвердий)	440,0	442,1	422,0	438,7	458,5
3	490,0 (напівтвердий)	510,6	484,9	493,6	488,3	492,9
4	570,0 (твердий)	575,3	578,4	585,9	581,5	566,9

Вимірювання параметра σ_B за допомогою запропонованого неруйнівного ультразвукового вимірювального контролю за зміною $\Delta c/c$ фазової швидкості

с ультразвукової хвилі зменшує похибки вимірювання в порівнянні з ультразвуковим приладом УК-10П, приблизно в $1,6 \dots 1,7$ рази, а за зміною $\Delta K/K$ коефіцієнта поглинання K ультразвукової хвилі зменшує похибки вимірювання в порівнянні з ультразвуковим приладом УК-10П приблизно в $1,3 \dots 1,4$ рази, при цьому достовірність контролю зростає до значення $0,975$.

Таким чином:

1. Розроблено і створено експериментальну установку, яка дозволяє визначати нелінійні параметри ультразвукової хвилі в низькочастотному діапазоні частот до $(200 \dots 300) \text{ кГц}$ за амплітуди ε_m відносної деформації матеріалу до $10^{-6} \dots 10^{-5}$.

2. Проведено розрахунок параметрів електроультразвукового тракту випромінювання/приймання, згідно з яким забезпечується найбільша чутливість при випромінюванні і прийманні завдяки роботі п'єзоелектричного випромінювача і п'єзоелектричного приймача відповідно в частотних областях послідовних резонансів f_{S_n} і паралельних резонансів (антирезонансів) f_{P_n} .

3. Виконано оцінювання похибок вимірювального перетворення. Показано, що похибки $p_{Д.В.Ф}(\delta)$ різноманітного походження від додаткових впливових факторів можуть істотно впливати на закон розподілу сумарної похибки $p(\delta_\Sigma)$.

4. Запропоновано методики вимірювання параметрів $\Delta c/c$ і $\Delta K/K$ ультразвукової хвилі, а також межі міцності на розрив σ_B . Також запропоновано здійснювати контроль міцності конструкційних полікристалічних матеріалів за критерієм “придатний-непридатний”.

5. Виконано порівняння результатів вимірювання межі міцності на розрив σ_B ультразвуковим неруйнівним вимірювальним контролем і руйнівним контролем, що показало зменшення похибки вимірювання в $1,3 \dots 1,7$ рази і підвищення достовірності контролю до значення $0,975$.

ВИСНОВКИ

В монографії розв'язано задачу удосконалення засобів неруйнівного контролю міцнісних характеристик, зокрема, межі міцності на розрив σ_B структурно-неоднорідних конструкційних полікристалічних матеріалів ультразвуковими методами з використанням нелінійних ефектів.

1. Зміну фазової швидкості і зміну коефіцієнта поглинання ультразвукової хвилі великої інтенсивності, яка використовується для зондування структурно-неоднорідних конструкційних полікристалічних матеріалів, можна застосовувати для контролю межі міцності на розрив σ_B цих матеріалів, що дозволяє підвищити достовірність контролю і зменшити похибки вимірювання порівняно з іншими наявними неруйнівними методами контролю.

2. Підвищити інформативність прийнятого сигналу в засобах неруйнівного ультразвукового вимірювального контролю межі міцності на розрив σ_B і зменшити вплив власної нелінійності електричних компонентів засобів вимірювання можливо, використовуючи зондувальну ультразвукову хвилю великої інтенсивності у вигляді пакетів коливань із заданим співвідношенням амплітуд.

3. В результаті проведення експериментальних досліджень і порівняння отриманих результатів визначення межі міцності на розрив методом лінійного ультразвуку, який базується на вимірюванні швидкості ультразвукової хвилі, з запропонованим методом встановлено, що врахування нелінійних ультразвукових ефектів знижує похибку вимірювання в 1,3...1,7 рази.

4. Визначено функціональну залежність між межею міцності на розрив σ_B структурно-неоднорідних конструкційних полікристалічних матеріалів і змінами фазової швидкості і коефіцієнта поглинання ультразвукової хвилі великої інтенсивності.

5. Розроблено нові неруйнівні ультразвукові засоби вимірювального контролю зміни фазової швидкості і коефіцієнта поглинання пружної хвилі великої інтенсивності, що дозволяють підвищити достовірність контролю і зменшити похибки вимірювання порівняно з іншими наявними неруйнівними засобами

контролю.

6. Запропоновано критерії контролю межі міцності на розрив σ_B структурно-неоднорідних конструкційних полікристалічних матеріалів у вигляді “придатний-непридатний”.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Asano S. Theory of nonlinear damping due to dislocation hysteresis / S. Asano // J. Phys. Soc. Jap. – 1970. – V. 29. – № 4. – P. 952–963.
2. Granato A. Theory of mechanical damping due to dislocation / A. Granato, K. Lucke // J. Appl. Phys. – 1956. – V. 27. – № 5. – P. 583–593.
3. Jonson P. Manifestation of nonlinear elasticity in rock: convincing evidence over large frequency and strain intervals from laboratory studies / P. Jonson, P.N. Rasolofosaon // Nonlinear Processes in Geophysics. – 1996. – V. 32. – P. 77–88.
4. Mark F. Hamilton. Nonlinear Acoustics / Mark F. Hamilton, David T. Blackstock. – Third Edition. – ASA PRESS- SPRINGER. – 2024. – 447 p.
5. Nazarov V.E. Experimental investigations of nonlinear acoustic phenomena in polycrystalline zinc / V.E. Nazarov, A.V. Kolpakov // J. Acoust. Soc. Amer. – 2000. – V. 107. – № 4. – P. 1915–1921.
6. Nazarov V.E. Nonlinear transformation of acoustic waves in microinhomogeneous media with relaxation / V.E. Nazarov, V.Yu. Zaitsev, I.Yu. Beliaeva // Acta Acustica. Acustica. – 2002. – V. 88. – № 1. – P. 40–49.
7. Nazarov V.E. The equation of state of microinhomogeneous media and the frequency dependence of their elastic nonlinearity / V.E. Nazarov, V.Yu. Zaitsev, I.Yu. Beliaeva // Acoust. Lett. – 1999. – V. 22. – № 12. – P. 236–241.
8. Nazarov V.E. Self-action of acoustic waves in rocks / V.E. Nazarov, S.V. Zimenkov // Acoustic Letters. – 1993. – V. 16. – № 10. – P. 218–221.
9. Nonlinear acoustic imaging: fundamentals, methodology and NDE-applications / N. Krohn, K. Pfeleiderer, R. Stoessel, I. Solodov, G. Busse [In: Arnold, W. and Hirsekorn, S. (Eds.): Acoustical Imaging. Kluwer Academic. Plenum Publishers]. – Dordrecht & New York. – 2004. – V. 27. – P. 91–98.
10. Sapozhnikov, O. A., Khokhlova, V. A., Cleveland, R. O., Blanc-Benon, P., and Hamilton, M. F. (2019). Nonlinear acoustics today. *Acoustics Today* 15, 55–64.
11. Беркута В.Г. Ультразвукова дефектоскопія: Навч. посіб. / В.Г. Беркута, С.М. Валеви́ч. – Кіровоград: ТОВ «Імекс-ЛТД», 2006. – 177 с.
12. Білокур І.П. Ультразвуковий контроль. Навчальний посібник / І.П. Білокур. – К.: Національний технічний університет “Київський політехнічний інститут”. – 1997. – 242 с.
13. Геворкян Е.С., Мельник О.М. Неруйнівні методи контролю: Конспект лекцій. – Харків: УкрДАЗТ, 2015. – 42 с.
14. Дідковський В.С. Електроакустичні п’єзокерамічні перетворювачі (розрахунок, проектування, конструювання): навч. посіб. / В.С. Дідковський, О.Г. Лейко, В.Г. Савін. – Кіровоград: «Імекс-ЛТД», 2006. – 468 с.

15. ДСТУ 2389-94. Технічне діагностування та контроль технічного стану. Терміни та визначення. – К.: Держстандарт України, 1994. – Чинний від 01.01.1995. – 24 с.
16. Zdorenko V.G Measurement of the relative change in surface density and density of textile materials using ultrasonic non-contact method// Zdorenko V.G., Zashchepkina N.N., Barylko S.V., Zheldak I.S.// ACTUAL PROBLEMS OF MODERN SCIENCE 2024, Kazimierz Wielki University, Bydgoszcz, Poland, 11-15 June 2024, P. 1021–1029.
17. Зенкін А.С. Удосконалення акустичного безконтактного контролю матеріалів із складною внутрішньою структурою / А.С. Зенкін, В.Г. Здоренко, С.В. Барилко, С.М. Лісовець // Метрологія та прилади. – 2018. – № 3 (71). – С. 47–51.
18. Здоренко В.Г. Застосування методу скінчених різниць в часовій області (СРЧО) для контролю структурно-неоднорідних полікристалічних матеріалів / В.Г. Здоренко, С.М. Лісовець // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2014. – № 1 (112). – С. 9–15.
19. Здоренко В.Г. Моделювання роботи електроультразвукового тракту з об'єктом дослідження / В.Г. Здоренко, С.М. Лісовець, С.В. Барилко, О.П. Яненко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2018. – № 2 (62). – С. 117–121.
20. Здоренко В.Г. Підвищення достовірності визначення швидкості ультразвукових коливань в листових матеріалах / В.Г. Здоренко, С.В. Барилко, С.М. Лісовець, І.Л. Ківа // Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. – 2022. – Т. 33 (72). – № 4. – С. 86–91. – DOI: 10.32838/2663-5941/2022.4/14.
21. Кисіль І.С. Метрологія, точність і надійність засобів вимірювання. Навчальний посібник / І.С. Кисіль. – Івано-Франківськ: Факел. – 2000. – 400 с.
22. Лісовець С.М. Акустичний контроль міцності структурно-неоднорідних конструкційних полікристалічних матеріалів з використанням нелінійних ефектів [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.11.13; Київ. нац. ун-т технологій та дизайну. – Київ, 2014. – 20 с.
23. Лісовець С.М. Ультразвуковий контроль якості неоднорідного матеріалу по зміні швидкості акустичної хвилі / С.М. Лісовець // Вісник Державної академії легкої промисловості України. – 1999. – № 2. – С. 114–115.
24. Лісовець С.М. Ультразвуковий контроль матеріалів із неоднорідною структурою методами нелінійної акустики / С.М. Лісовець, І.Л. Ківа // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія “Технічні науки”. – № 1 (82). – 2015. – С. 110–116.

25. Лісовець С.М. Ультразвуковий контроль конструкційних матеріалів з використанням амплітудно-залежного внутрішнього тертя / С.М. Лісовець, А.С. Зенкін, В.Г. Здоренко // Метрологія та прилади. – 2015. – № 6 (56). – С. 24–27.
26. Лісовець С.М. Застосування акустичного ефекту амплітудно-залежного внутрішнього тертя при контролі деталей з полікристалічних матеріалів / С.М. Лісовець, А.С. Зенкін // Вісник інженерної академії України. – 2015. – № 4. – С. 155–161.
27. Лісовець С.М. Вплив відносної пружності дефектів на параметри ультразвукових хвиль в мікронеоднорідних середовищах // IX Міжнародна науково-технічна конференція “Приладобудування 2010: стан і перспективи”. – К.: НТУУ “КПІ”, 2010. – С. 243-244. – (27-28 квітня 2010, Київ).
28. Лісовець С.М. Вплив міцнісних характеристик структурно неоднорідних полікристалічних матеріалів на параметри пружної хвилі та на коефіцієнти нелінійностей гістерезисних моделей / С.М. Лісовець // Вісник КНУТД. – 2013. – № 2 (70). – С. 34-40.
29. Лісовець С.М. Ефективна діагностика структурно неоднорідних середовищ на основі гістерезисних моделей тертя та відриву // X Всеукраїнська конференція молодих вчених та студентів “Наукові розробки молоді на сучасному етапі”. – К.: КНУТД, 2011. – С. 32. – (19-20 квітня, 2011).
30. Лісовець С.М. Застосовування повного факторного експерименту при акустичному нелінійному контролі полікристалічних матеріалів // XII Міжнародна науково-технічна конференція “Приладобудування 2013: стан і перспективи”. – К.: НТУУ “КПІ”, 2013. – С. 217. – (23-24 квітня 2013, Київ).
31. Лісовець С.М. Застосування пакету MATLAB 2009b для моделювання рівнянь стану мікронеоднорідних середовищ // Тези доповідей IX Ювілейної Всеукраїнської наукової конференції молодих вчених та студентів, присвяченої 80-річчю КНУТД “Наукові розробки молоді на сучасному етапі”. – К.: КНУТД, 2010. – С. 132-133. – (22-23 квітня 2010, Київ).
32. Лісовець С.М. Контроль зерненої структури полікристалічних матеріалів за допомогою нелінійних ультразвукових ефектів // XI Міжнародна науково-технічна конференція “Приладобудування 2012: стан і перспективи”. – К.: НТУУ “КПІ”, 2012. – С. 208. – (24-25 квітня 2012, Київ).
33. Лісовець С.М. Контроль параметрів полімерних і композиційних матеріалів з високою точністю // Збірник наукових праць молодих вчених та студентів. – К.: ДАЛПУ, 1998. – Ч. 3. – С. 10. – (23 квітня 1998, Київ).
34. Лісовець С.М. Нелінійні мікронеоднорідні середовища: нові можливості контролю [Присвячено 80-річчю з дня заснування Київського національного університету технологій та дизайну] // Вісник КНУТД. – 2010. – Т. 3. – № 5. – С. 213-215. – (2010, Київ).

35. Лісовець С.М. Оптимізація акустичного контролю структурно-неоднорідних полікристалічних матеріалів методами планування експериментів / С.М. Лісовець // Вісник КНУТД. – 2013. – № 3 (71). – С. 34-40.
36. Лісовець С.М. Вимірювання часу проходження ультразвукових імпульсів в твердотільних середовищах / С.М. Лісовець, Ю.О. Скрипник // Вісник КНУТД. – 2010. – № 1 (51). – С. 17-23.
37. Лісовець С.М. Діагностування структурно неоднорідних середовищ з гістерезисною квадратичною нелінійністю та релаксацією / С.М. Лісовець, Ю.О. Скрипник // Вісник КНУТД. – 2011. – № 6 (62). – С. 27-33.
38. Лісовець С.М. Оцінка нелінійності ультразвукових характеристик матеріалів / С.М. Лісовець, Ю.О. Скрипник // Вісник КНУТД. – 2011, № 1 (57). – С. 30-36.
39. Лісовець С.М. Вплив дефектів мікронеоднорідного середовища на параметри пружної хвилі: нові можливості діагностування / С.М. Лісовець, Ю.О. Скрипник, Осадчий В.П. // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2010. – № 1 (35). – С. 106-110.
40. Лісовець С.М. Контроль міцності силових конструкцій з полікристалічних матеріалів із застосуванням неруйнівних нелінійних ультразвукових методів / Лісовець С.М., А.С. Зенкін // Стандартизація, сертифікація, якість. – 2018. – № 3 (110). – С. 63–70.
41. Лісовець С.М. Підвищення достовірності оцінки міцності конструкційних матеріалів засобами нелінійної акустики / С.М. Лісовець, М.А. Зенкін // Метрологія та прилади. – 2020. – № 6 (86). – С. 23–30. – DOI: 10.33955/2307-2180(6)2020.23-30.
42. Основи ультразвукового неруйнівного контролю: Підручник/В.К.Цапенко, Ю.В.Куц.- К.:НТУУ «КПІ». – 2010. – 448 с.
43. Патент № 13404 А. Україна. МПК G01N 5/00, G01N 29/00, G01N 29/07, G01N 29/48. Спосіб визначення швидкості розповсюдження ультразвукових коливань в нелінійних середовищах і пристрій для його здійснення. – Державна академія легкої промисловості України; Скрипник Ю.О., Здоренко В.Г., Лісовець С.М. – № 95010204; Заявл. 12.01.1995; Опубл. 16.12.1996; Бюл. № 1.
44. Патент № 15043 А. Україна. МПК G01N 29/04. Пристрій дефектоскопії п'єзокерамічних перетворювачів. – Державна академія легкої промисловості України; Скрипник Ю.О., Лісовець С.М. – № 94032299; Заявл. 25.03.1994; Опубл. 30.06.1997; Бюл. № 3.
45. Патент № 15261 А. Україна. МПК G01N 29/00, G01N 29/04. Спосіб дефектоскопії п'єзокерамічних перетворювачів. – Державна академія легкої промисловості України; Скрипник Ю.О., Лісовець С.М. – № 94032295; Заявл. 29.03.1994; Опубл. 30.06.1997; Бюл. № 3.

46. 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.
47. Патент № 18080 А. Україна. МПК G01N 29/04, G01N 5/00. Спосіб вимірювання нелінійності акустичного тракту і пристрій для його здійснення. – Державна академія легкої промисловості України; Скрипник Ю.О., Здоренко В.Г., Лісовець С.М. – № 96083088; Заявл. 01.08.1996; Опубл. 17.06.1997, Бюл. № 5.
48. Патент № 22938 А. Україна. МПК G01N 29/04, G01S 15/00. Спосіб вимірювання нелінійності акустичного тракту і пристрій для його здійснення. – Державна академія легкої промисловості України; Скрипник Ю.О., Здоренко В.Г., Лісовець С.М. – № 96072772; Заявл. 10.07.1996; Опубл. 05.05.1998, Бюл. № 3.
49. Защепкіна Н.М. Інженерні методи проектування заданих властивостей матеріалів. – Вінниця. ТОВ «Нілан –ЛТД», 2016. – 207 с.
50. Zdorenko V.G. Design of the Models and Methods of Constructing Computerized Control Systems of Technological Parameters of Textile Materials / Zdorenko V.G., Zashchepkina N.N., Barylko S.V., Zaporozhets A.O., Lisovets S.M., Kiva I.L. // Studies in Systems, Decision and Control, 2023, 460, P. 167-214. doi:10.1007/978-3-031-23639-6_5.
51. Патент № 42857. Україна. МПК G01N 29/11, G01N 29/22. Вимірювач нелінійності акустичного тракту. – Державна академія легкої промисловості України; Скрипник Ю.О., Лісовець С.М. – № 98063405; Заявл. 30.06.1998; Опубл. 15.11.2001, Бюл. № 10.
52. Патент № 50186. Україна. МПК G01N 7/00. Спосіб вимірювання часу проходження ультразвукових імпульсів. – Київський національний університет технологій та дизайну; Скрипник Ю.О., Лісовець С.М. – № u200913061; Заявл. 15.12.2009; Опубл. 25.05.2010, Бюл. № 10.
53. Патент № 52435 А. Україна. МПК G01F 23/28. Ультразвуковий спосіб вимірювання рівня рідин і глибин. – Київський національний університет технологій та дизайну; Скрипник Ю.О., Здоренко В.Г., Лісовець С.М. – № 2002053965; Заявл. 15.05.2002; Опубл. 16.12.2002, Бюл. № 12.
54. Патент № 57892. Україна. МПК G01F 23/28. Пристрій для вимірювання нелінійності ультразвукових характеристик матеріалів. – Київський національний університет технологій та дизайну; Скрипник Ю.О., Лісовець С.М. – № u201013422; Заявл. 11.11.2010; Опубл. 10.03.2011, Бюл. № 5.

55. Себко В.В. Комп'ютерне моделювання акустичного контролю структурно-неоднорідних середовищ [Електронний ресурс] // Технології та дизайн. – 2013. – № 1 (6). – Київський національний університет технологій та дизайну.
56. Скрипник Ю.О. Визначення змінення швидкості розповсюдження ультразвукових коливань у нелінійних середовищах за допомогою фазочутливих засобів / Ю.О. Скрипник, В.Г. Здоренко, С.М. Лісовець // Наукові праці ювілейної наукової конференції професорсько-викладацького складу, присвяченої 65-річчю заснування академії. – К.: ДАЛПУ, 1995. – С. 39. – (18-21 квітня 1995, Київ).
57. Zdorenko V.G Research on the Interaction of Ultrasonic Waves with Various Textile Materials in the Process of Non-contact Control/ Zdorenko V.G., Zashchepkina N.N., Barylko S.V., Zaporozhets A.O., Lisovets S.M., Kiva I.L. // Studies in Systems, Decision and Control, 2023, 460, P. 83-124. doi:10.1007/978-3-031-23639-6_3.
58. Скрипник Ю.О. Визначення складу матеріалів зондуванням їх акустичними коливаннями скінченої амплітуди / Ю.О. Скрипник, С.М. Лісовець // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 1998. – № 1 (3). – С. 46-49.
59. Скрипник Ю.О. Вимірювач нелінійності акустичного тракту / Ю.О. Скрипник, С.М. Лісовець // Праці IV Міжнародної науково-технічної конференції “Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах і конверсії виробництва”. – К.: ДАЛПУ, 1998. – С. 98-102. – 7-11 вересня 1998, Севастополь).
60. Сусліков Л.М., Студеняк І.П. Неруйнівні методи контролю: Навчальний посібник. – Ужгород: Видавництво УжНУ, 2016. – 192 с.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ЗМІНИ КОЕФІЦІЄНТА ЗАГАСАННЯ ДЛЯ ГІСТЕРЕЗИСУ ТЕРТЯ

Табл. А.1. Залежності $K = f(\alpha)$

α	Коефіцієнт K хвилі за $\varepsilon_m = 10^{-7}$	Коефіцієнт K хвилі за $\varepsilon_m = 0,1 \cdot 10^{-5}$	Коефіцієнт K хвилі за $\varepsilon_m = 0,2 \cdot 10^{-5}$	Коефіцієнт K хвилі за $\varepsilon_m = 0,5 \cdot 10^{-5}$	Коефіцієнт K хвилі за $\varepsilon_m = 1,0 \cdot 10^{-5}$
1	2	3	4	5	6
200	0,9986	0,9860	0,9715	0,9296	0,8620
300	0,9956	0,9820	0,9665	0,9236	0,8550
400	0,9926	0,9780	0,9615	0,9176	0,8480
500	0,9896	0,9740	0,9565	0,9116	0,8410
600	0,9866	0,9700	0,9515	0,9056	0,8340
700	0,9836	0,9660	0,9465	0,8996	0,8270
800	0,9806	0,9620	0,9415	0,8936	0,8200
900	0,9776	0,9580	0,9365	0,8876	0,8130
1000	0,9746	0,9540	0,9315	0,8816	0,8060
1100	0,9716	0,9500	0,9265	0,8756	0,7990
1200	0,9686	0,946	0,9215	0,8696	0,7920
1300	0,9656	0,942	0,9165	0,8636	0,7850
1400	0,9626	0,9380	0,9115	0,8576	0,7780
1500	0,9596	0,9340	0,9065	0,8516	0,7710
1600	0,9566	0,9300	0,9015	0,8456	0,7640
1700	0,9536	0,9260	0,8965	0,8396	0,7570
1800	0,9506	0,9220	0,8915	0,8336	0,7500
1900	0,9476	0,9180	0,8865	0,8276	0,7430
2000	0,9446	0,9140	0,8815	0,8216	0,7360

Табл. А.2. Залежності $K = f(\beta_1, \beta_2)$

β_1, β_2	Коефіцієнт K хвилі за $\varepsilon_m = 10^{-7}$	Коефіцієнт K хвилі за $\varepsilon_m = 0,1 \cdot 10^{-5}$	Коефіцієнт K хвилі за $\varepsilon_m = 0,2 \cdot 10^{-5}$	Коефіцієнт K хвилі за $\varepsilon_m = 0,5 \cdot 10^{-5}$	Коефіцієнт K хвилі за $\varepsilon_m = 1,0 \cdot 10^{-5}$
1	2	3	4	5	6
200	0,9988	0,9952	0,9904	0,9763	0,9529
300	0,9988	0,9928	0,9857	0,9645	0,9297
400	0,9988	0,9904	0,9810	0,9529	0,9069
500	0,9988	0,9881	0,9763	0,9413	0,8843
600	0,9988	0,9857	0,9716	0,9297	0,8620
700	0,9988	0,9833	0,9669	0,9183	0,8399
800	0,9988	0,9810	0,9622	0,9069	0,8181
900	0,9988	0,9786	0,9575	0,8955	0,7966
1000	0,9988	0,9783	0,9528	0,8843	0,7915
1100	0,9988	0,9739	0,9482	0,8731	0,8068
1200	0,9988	0,9716	0,9436	0,8620	0,8229
1300	0,9988	0,9692	0,9389	0,8509	0,8394
1400	0,9988	0,9669	0,9343	0,8399	0,8562
1500	0,9988	0,9645	0,9297	0,8290	0,8729
1600	0,9988	0,9622	0,9251	0,8181	0,8896
1700	0,9988	0,9599	0,9205	0,8073	0,9060
1800	0,9988	0,9575	0,9160	0,7966	0,9222
1900	0,9988	0,9552	0,9114	0,7843	0,9380
2000	0,9988	0,9529	0,9069	0,7915	0,9534

Табл. А.3. Залежності $\Delta K/K = f(\beta_1, \beta_2)$

β_1, β_2	Відносна зміна $\Delta K/K$			
	Співвідношення амплітуд, хвиль $10:1$	Співвідношення амплітуд, хвиль $20:1$	Співвідношення амплітуд, хвиль $50:1$	Співвідношення амплітуд, хвиль $100:1$
1	2	3	4	5
200	0,00360	0,00831	0,02251	0,04596
300	0,00601	0,01306	0,03426	0,06918
400	0,00841	0,01779	0,04594	0,09201
500	0,01071	0,02251	0,05756	0,11464
600	0,01312	0,02722	0,06911	0,13696
700	0,01552	0,03191	0,08059	0,15909
800	0,01782	0,03660	0,09200	0,18092
900	0,02022	0,04128	0,10334	0,20244
1000	0,02052	0,04598	0,11462	0,20755
1100	0,02493	0,05060	0,12582	0,19223
1200	0,02723	0,05524	0,13696	0,17611
1300	0,02964	0,05988	0,14804	0,15959
1400	0,03194	0,06450	0,15904	0,14277
1500	0,03434	0,06911	0,16997	0,12605
1600	0,03664	0,07372	0,18084	0,10933
1700	0,03895	0,07830	0,19164	0,09291
1800	0,04135	0,08288	0,20237	0,07669
1900	0,04365	0,08744	0,21467	0,06087
2000	0,04596	0,09200	0,20748	0,04545

Табл. А.4. Залежності $\Delta K/K$ від межі міцності на розрив σ_B

Межа міцності на розрив σ_B , МПа	Відносна зміна $\Delta K/K$			
	Співвідношення амплітуд, хвиль $10:1$	Співвідношення амплітуд, хвиль $20:1$	Співвідношення амплітуд, хвиль $50:1$	Співвідношення амплітуд, хвиль $100:1$
1	2	3	4	5
650	0,004805	0,010685	0,028385	0,05757
350	0,016670	0,034255	0,086295	0,170005

ДОДАТОК Б

РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ЗМІНИ ФАЗОВОЇ ШВИДКОСТІ ДЛЯ

ГІСТЕРЕЗИСУ ТЕРТЯ

Табл. Б.1. Залежності $c = f(\alpha)$

α	Швидкість c хвилі за $\varepsilon_m = 10^{-7}$	Швидкість c хвилі за $\varepsilon_m = 0,1 \cdot 10^{-5}$	Швидкість c хвилі за $\varepsilon_m = 0,2 \cdot 10^{-5}$	Швидкість c хвилі за $\varepsilon_m = 0,5 \cdot 10^{-5}$	Швидкість c хвилі за $\varepsilon_m = 1,0 \cdot 10^{-5}$
1	2	3	4	5	6
200	4429,956	4429,557	4429,114	4427,786	4425,574
300	4429,934	4429,336	4428,671	4426,68	4423,365
400	4429,911	4429,114	4428,229	4425,574	4421,158
500	4429,889	4428,893	4427,786	4424,469	4418,953
600	4429,867	4428,671	4427,344	4423,365	4416,75
700	4429,845	4428,45	4426,901	4422,261	4414,549
800	4429,823	4428,229	4426,459	4421,158	4412,351
900	4429,801	4428,007	4426,017	4420,055	4410,154
1000	4429,778	4427,786	4425,574	4418,953	4407,96
1100	4429,756	4427,565	4425,132	4417,851	4405,768
1200	4429,734	4427,344	4424,69	4416,75	4403,578
1300	4429,712	4427,122	4424,248	4415,649	4401,391
1400	4429,69	4426,901	4423,807	4414,549	4399,206
1500	4429,668	4426,68	4423,365	4413,45	4397,022
1600	4429,646	4426,459	4422,923	4412,351	4394,841
1700	4429,623	4426,238	4422,482	4411,252	4392,662
1800	4429,601	4426,017	4422,04	4410,154	4390,486
1900	4429,579	4425,796	4421,599	4409,057	4388,311
2000	4429,557	4425,574	4421,158	4407,96	4386,139

Табл. Б.2. Залежності $\Delta c/c = f(\alpha)$

α	Відносна зміна $\Delta c/c$			
	Співвідношення амплітуд, хвиль $10:1$	Співвідношення амплітуд, хвиль $20:1$	Співвідношення амплітуд, хвиль $50:1$	Співвідношення амплітуд, хвиль $100:1$
1	2	3	4	5
200	0,000090	0,000190	0,000490	0,000989
300	0,000135	0,000285	0,000734	0,001483
400	0,000180	0,000380	0,000979	0,001976
500	0,000225	0,000475	0,001223	0,002469
600	0,000270	0,000570	0,001468	0,002961
700	0,000315	0,000665	0,001712	0,003453
800	0,000360	0,000759	0,001956	0,003944
900	0,000405	0,000854	0,002200	0,004435
1000	0,000450	0,000949	0,002444	0,004925
1100	0,000495	0,001044	0,002688	0,005415
1200	0,000540	0,001139	0,002931	0,005905
1300	0,000585	0,001233	0,003175	0,006393
1400	0,000630	0,001328	0,003418	0,006882
1500	0,000674	0,001423	0,003661	0,007370
1600	0,000719	0,001518	0,003904	0,007857
1700	0,000764	0,001612	0,004147	0,008344
1800	0,000809	0,001707	0,004390	0,008831
1900	0,000854	0,001802	0,004633	0,009316
2000	0,000899	0,001896	0,004876	0,009802

Табл. Б.3. Залежності $\Delta c/c$ від межі міцності на розрив σ_B

Межа міцності на розрив σ_B , МПа	Відносна зміна $\Delta c/c$			
	Співвідношення амплітуд, хвиль $10:1$	Співвідношення амплітуд, хвиль $20:1$	Співвідношення амплітуд, хвиль $50:1$	Співвідношення амплітуд, хвиль $100:1$
1	2	3	4	5
650	0,0001125	0,0002375	0,000612	0,001236
350	0,0003375	0,000712	0,001834	0,0036985

Табл. Б.4. Залежності $c = f(\beta_1, \beta_2)$ у середовищі з гістерезисом тертя

β_1, β_2	Швидкість c хвилі за $\varepsilon_m = 10^{-7}$	Швидкість c хвилі за $\varepsilon_m = 0,1 \cdot 10^{-5}$	Швидкість c хвилі за $\varepsilon_m = 0,2 \cdot 10^{-5}$	Швидкість c хвилі за $\varepsilon_m = 0,5 \cdot 10^{-5}$	Швидкість c хвилі за $\varepsilon_m = 1,0 \cdot 10^{-5}$
1	2	3	4	5	6
200	4429,867	4428,671	4427,344	4423,365	4416,750
300	4428,067	4426,571	4424,944	4420,465	4413,450
400	4426,267	4424,471	4422,544	4417,565	4410,150
500	4424,467	4422,371	4420,144	4414,665	4406,850
600	4422,667	4420,271	4417,744	4411,765	4403,550
700	4420,867	4418,171	4415,344	4408,865	4400,250
800	4419,067	4416,071	4412,944	4405,965	4396,950
900	4417,267	4413,971	4410,544	4403,065	4393,650
1000	4415,467	4411,871	4408,144	4400,165	4390,350
1100	4413,667	4409,771	4405,744	4397,265	4387,050
1200	4411,867	4407,671	4403,344	4394,365	4383,75
1300	4410,067	4405,571	4400,944	4391,465	4380,450
1400	4408,267	4403,471	4398,544	4388,565	4377,150
1500	4406,467	4401,371	4396,144	4385,665	4373,850
1600	4404,667	4399,271	4393,744	4382,765	4370,550
1700	4402,867	4397,171	4391,344	4379,865	4367,250
1800	4401,067	4395,071	4388,944	4376,965	4363,950
1900	4399,267	4392,971	4386,544	4374,065	4360,650
2000	4397,467	4390,871	4384,144	4371,165	4357,350

ДОДАТОК В

РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ЗМІНИ КОЕФІЦІЄНТА ЗАГАСАННЯ ДЛЯ

ГІСТЕРЕЗИСУ ВІДРИВУ

Табл. В.1. Залежності $K = f(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4)$

$\frac{\gamma_1, \gamma_2}{\gamma_3, \gamma_4}$	Коефіцієнт K хвилі за $\varepsilon_m = 10^{-7}$ (верхня півхвиля/ нижня півхвиля)	Коефіцієнт K хвилі за $\varepsilon_m = 0,1 \cdot 10^{-5}$ (верхня півхвиля/ нижня півхвиля)	Коефіцієнт K хвилі за $\varepsilon_m = 0,2 \cdot 10^{-5}$ (верхня півхвиля/ нижня півхвиля)	Коефіцієнт K хвилі за $\varepsilon_m = 0,5 \cdot 10^{-5}$ (верхня півхвиля/ нижня півхвиля)	Коефіцієнт K хвилі за $\varepsilon_m = 1,0 \cdot 10^{-5}$ (верхня півхвиля/ нижня півхвиля)
1	2	3	4	5	6
400	1,0000	1,000072	1,000307	1,001188	1,003205
600	1,0000	0,997731	0,995578	0,989494	0,980166
800	1,0000	1,000307	1,000863	1,003205	1,007984
1200	1,0000	0,995578	0,991478	0,980166	0,963204
1200	1,0000	1,000566	1,001536	1,005446	1,013008
1800	1,0000	0,993500	0,987547	0,971423	0,947581
1600	1,0000	1,000863	1,002321	1,007984	1,017945
2400	1,0000	0,991478	0,983780	0,963204	0,932801
2000	1,0000	1,001188	1,003205	1,010323	1,022599
3000	1,0000	0,989494	0,980166	0,955130	0,918591
2400	1,0000	1,001536	1,004116	1,013008	1,026907
3600	1,0000	0,987547	0,976658	0,947581	0,904777
2800	1,0000	1,001908	1,004995	1,015259	1,030831
4200	1,0000	0,985643	0,973159	0,939868	0,891258
3200	1,0000	1,002321	1,005901	1,017945	1,034352
4800	1,0000	0,983780	0,969701	0,932801	0,877978
3600	1,0000	1,002757	1,006916	1,020056	1,037466
5400	1,0000	0,981957	0,966389	0,925343	0,864916

Табл. В.2. Залежності $\Delta K/K = f(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4)$

$\frac{\gamma_1, \gamma_2}{\gamma_3, \gamma_4}$	Відносна зміна $\Delta K/K$			
	Співвідношення амплітуд, хвиль $10:1$	Співвідношення амплітуд, хвиль $20:1$	Співвідношення амплітуд, хвиль $50:1$	Співвідношення амплітуд, хвиль $100:1$
1	2	3	4	5
$\frac{400}{600}$	0,00110	0,00206	0,00466	0,00831
$\frac{800}{1200}$	0,00206	0,00383	0,00831	0,01441
$\frac{1200}{1800}$	0,00297	0,00546	0,01157	0,01971
$\frac{1600}{2400}$	0,00383	0,00695	0,01441	0,02463
$\frac{2000}{3000}$	0,00466	0,00831	0,01727	0,02941
$\frac{2400}{3600}$	0,00546	0,00961	0,01971	0,03416
$\frac{2800}{4200}$	0,00622	0,01092	0,02244	0,03896
$\frac{3200}{4800}$	0,00695	0,01220	0,02463	0,04384
$\frac{3600}{5400}$	0,00764	0,01335	0,02730	0,04881

Табл. В.3. Залежності $\Delta K/K$ від межі міцності на розрив σ_B

Межа міцності на розрив $\sigma_B, \text{МПа}$	Відносна зміна $\Delta K/K$			
	Співвідношення амплітуд, хвиль $10:1$	Співвідношення амплітуд, хвиль $20:1$	Співвідношення амплітуд, хвиль $50:1$	Співвідношення амплітуд, хвиль $100:1$
1	2	3	4	5
650	0,00110	0,00206	0,00466	0,00831
350	0,00764	0,01335	0,02730	0,04881

ДОДАТОК Г
РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ЗМІНИ ФАЗОВОЇ ШВИДКОСТІ ДЛЯ
ГІСТЕРЕЗИСУ ВІДРИВУ

Табл. Г.1. Залежності $c = f(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4)$

$\frac{\gamma_1, \gamma_2}{\gamma_3, \gamma_4}$	Швидкість c хвилі за $\varepsilon_m = 10^{-7}$	Швидкість c хвилі за $\varepsilon_m = 0,1 \cdot 10^{-5}$	Швидкість c хвилі за $\varepsilon_m = 0,2 \cdot 10^{-5}$	Швидкість c хвилі за $\varepsilon_m = 0,5 \cdot 10^{-5}$	Швидкість c хвилі за $\varepsilon_m = 1,0 \cdot 10^{-5}$
1	2	3	4	5	6
$\frac{400}{600}$	4430,076	4430,024	4429,805	4429,46	4426,762
$\frac{800}{1200}$	4430,079	4429,805	4429,717	4426,762	4422,723
$\frac{1200}{1800}$	4430,079	4429,539	4428,422	4424,591	4417,596
$\frac{1600}{2400}$	4430,109	4429,717	4427,644	4422,723	4412,271
$\frac{2000}{3000}$	4430,199	4429,46	4426,762	4419,927	4406,846
$\frac{2400}{3600}$	4430,282	4428,422	4425,933	4417,596	4401,455
$\frac{2800}{4200}$	4430,229	4428,915	4425,655	4414,955	4395,995
$\frac{3200}{4800}$	4430,131	4427,644	4424,825	4412,271	4390,543
$\frac{3600}{5400}$	4430,060	4428,073	4423,286	4409,551	4385,087

Табл. Г.2. Залежності $\Delta c/c = f(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4)$

$\frac{\gamma_1, \gamma_2}{\gamma_3, \gamma_4}$	Відносна зміна $\Delta c/c$			
	Співвідношення амплітуд, хвиль $10:1$	Співвідношення амплітуд, хвиль $20:1$	Співвідношення амплітуд, хвиль $50:1$	Співвідношення амплітуд, хвиль $100:1$
1	2	3	4	5
$\frac{400}{600}$	0,000012	0,000061	0,000139	0,000748
$\frac{800}{1200}$	0,000062	0,000082	0,000749	0,001661
$\frac{1200}{1800}$	0,000122	0,000374	0,001239	0,002818
$\frac{1600}{2400}$	0,000089	0,000557	0,001667	0,004027
$\frac{2000}{3000}$	0,000167	0,000776	0,002319	0,005271
$\frac{2400}{3600}$	0,00042	0,000982	0,002864	0,006507
$\frac{2800}{4200}$	0,000296	0,001032	0,003448	0,007727
$\frac{3200}{4800}$	0,000562	0,001198	0,004032	0,008936
$\frac{3600}{5400}$	0,000449	0,001529	0,00463	0,010152

Табл. Г.3. Залежності $\Delta c/c$ від межі міцності на розрив σ_B

Межа міцності на розрив $\sigma_B, \text{МПа}$	Відносна зміна $\Delta c/c$			
	Співвідношення амплітуд, хвиль $10:1$	Співвідношення амплітуд, хвиль $20:1$	Співвідношення амплітуд, хвиль $50:1$	Співвідношення амплітуд, хвиль $100:1$
1	2	3	4	5
650	0,000012	0,000061	0,000139	0,000748
350	0,000449	0,001529	0,00463	0,010152