

---

**АВТОМАТИКА ТА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА**


---

УДК 534.08

**В. Г. Здоренко<sup>1</sup>**  
**С. М. Лісовець<sup>1</sup>**

## ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ СКІНЧЕННИХ РІЗНИЦЬ В ЧАСОВІЙ ОБЛАСТІ ДЛЯ КОНТРОЛЮ СТРУКТУРНО-НЕОДНОРІДНИХ ПОЛІКРИСТАЛІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

<sup>1</sup>Київський національний університет технологій та дизайну

*Розглядається можливість застосування скінченно-різницевого методу в часовій області (СРЧО) для розрахунку проходження через структурно-неоднорідний полікристалічний матеріал пружної хвилі, що дозволяє по нелінійній зміні її параметрів, таких як амплітудно-залежні коефіцієнти поглинання та швидкість, контролювати фізико-механічні властивості цього матеріалу, зокрема його міцність.*

**Ключові слова:** скінченно-різницевий метод, структурно-неоднорідний полікристалічний матеріал, захисний шар, демпфуючий шар, двошарова схема обчислень.

### Вступ

В теперішній час скінченно-різницевий метод в часовій області (СРЧО) набув значної популярності. Він базується на тому, що диференціальні рівняння в частинних похідних, які описують розповсюдження через структурно-неоднорідний полікристалічний матеріал пружної хвилі, дискретизуються як у просторі, так і у часі. Однією з переваг методу СРЧО є те, що він дозволяє моделювати нестационарні хвильові процеси в в'язко-пружних, неоднорідних анізотропних та нелінійних середовищах [1]. До недоліків методу СРЧО відносять те, що при його застосуванні в процесі розрахунків накопичуються похибки математичних обчислень, а також те, що для моделювання тривимірних хвильових процесів необхідно застосувати багатопроекторну паралельну обробку даних [1].

Крайові умови природним шляхом входять до алгоритму розрахунків методу СРЧО [1]. Таким чином, досить легко розрахувати розповсюдження пружних хвиль через такі елементи електроакустичного тракту, як п'єзокерамічний елемент, захисний шар, демпфуючий шар та деякі інші та через безпосередньо полікристалічний матеріал, які виконані з різних за фізичними властивостями речовин. Зазвичай застосовується двошарова скінченно-різницева схема обчислень, в якій необхідно обчислювати похідні по координатах та по часу лише першого порядку — таким чином, точність обчислень суттєво підвищується. Розв'язки проходження пружної хвилі шукаються, як правило, у вузлах дво- або тривимірної сітки.

### Постановка задачі

При моделюванні розповсюдження пружної хвилі через однорідне в'язко-пружне середовище зв'язок між механічною напругою  $\sigma$  та відносною деформацією  $\varepsilon$  встановлюється, як правило, у вигляді моделі Кельвіна–Фойгта в'язко-пружного середовища, яка для одновимірного випадку має вигляд

$$\sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) = E\varepsilon + \eta\dot{\varepsilon}, \quad (1)$$

де  $E$  — лінійний модуль пружності;  $\eta$  — динамічна в'язкість.

Також застосовуються деякі інші моделі, такі як модель Максвелла або модель Зінера. Але, як показує багато досліджень, поведінка структурно-неоднорідних матеріалів (зокрема, полікристалічних) у разі проходження через них пружних хвиль суттєво відрізняється від поведінки однорідних в'язко-пружних середовищ [2, 3]. Зокрема, це проявляється в різномодульності (відмінності

модулів пружності у разі стискання та розтягування) та у появі гістерезисної (неоднозначної) залежності  $\sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$ .

В загальному випадку рівняння стану структурно-неоднорідного полікристалічного матеріалу описується рівнянням, яке враховує як анізотропію пружних властивостей такого матеріалу, так і його амплітудно-залежне внутрішнє тертя:

$$\sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) = E(\varepsilon - f(\varepsilon, \dot{\varepsilon})), \quad (2)$$

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

Для гістерезису тертя функція  $f(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$  має вигляд [2, 3]:

$$f(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) = \alpha \varepsilon_0 \varepsilon + \begin{cases} 0,5 \beta_1 \varepsilon^2 - 0,25(\beta_1 + \beta_2) \varepsilon_0^2, & \dot{\varepsilon} > 0; \\ -0,5 \beta_2 \varepsilon^2 + 0,25(\beta_1 + \beta_2) \varepsilon_0^2, & \dot{\varepsilon} < 0, \end{cases} \quad (3)$$

де  $\varepsilon_0$  — амплітуда відносної деформації;  $\alpha$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  — нелінійні параметри.

Для гістерезису відриву функція  $f(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$  має дещо інший вигляд [2, 3]:

$$f(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) = \begin{cases} 0,5 \gamma_1 \varepsilon^2, & \varepsilon > 0, \dot{\varepsilon} > 0; \\ -0,5 \gamma_2 \varepsilon^2 + 0,5(\gamma_1 + \gamma_2) \varepsilon_0^+ \varepsilon, & \varepsilon > 0, \dot{\varepsilon} < 0; \\ -0,5 \gamma_3 \varepsilon^2, & \varepsilon < 0, \dot{\varepsilon} < 0; \\ 0,5 \gamma_4 \varepsilon^2 + 0,5(\gamma_3 + \gamma_4) \varepsilon_0^- \varepsilon, & \varepsilon < 0, \dot{\varepsilon} > 0, \end{cases} \quad (4)$$

де  $\varepsilon_0^+$  — амплітуда відносної деформації при стисканні;  $\varepsilon_0^-$  — амплітуда відносної деформації при розтягуванні;  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$ ,  $\gamma_3$ ,  $\gamma_4$  — нелінійні параметри.

Відомо, що, наприклад, для сплаву мідно-цинкового (латуні) ЛС59-1 ДСТУ ГОСТ 2060:2007 для значення межі міцності при розриві  $\sigma_B \approx (600 \dots 650)$  МПа нелінійний параметр  $\alpha$  має значення приблизно 200...300, нелінійні параметри  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  — 200...300, нелінійні параметри  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$ ,  $\gamma_3$ ,  $\gamma_4$  — 400...600 [2—4]. Водночас для значення межі міцності при розриві  $\sigma_B \approx (350 \dots 400)$  МПа нелінійний параметр  $\alpha$  має значення 700...800, нелінійні параметри  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  — 700...800, нелінійні параметри  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$ ,  $\gamma_3$ ,  $\gamma_4$  — 3600...5400. Зміна межі міцності  $\sigma_B$  може виникати, наприклад, під впливом тривалих механічних та (або) теплових навантажень. Вона може бути пов'язана, за відсутності явних дефектів структури у вигляді тріщин або порожнин, із зміною зерненої структури полікристалічного матеріалу.

Тому постановка задачі в загальному випадку полягає в тому, щоб за допомогою методу скінченних різниць в часовій області (СРЧО) змоделювати розповсюдження через структурно-неоднорідні полікристалічні матеріали пружної хвилі, використовуючи гістерезисні рівняння стану, та порівняти їх із даними експериментальних досліджень. Причому, для спрощення розрахунків розглядається одновимірна задача, коли дисковий п'єзокерамічний елемент створює коливання тільки по товщині на одній п'єзожорсткій моді. Так як метод СРЧО дозволяє розраховувати хвильові процеси для практично довільних крайових умов, він може застосовуватися для моделювання хвильових процесів в штампованих деталях, трубах теплообмінників, високонавантаженої арматури, вкладишах до підшипників та в інших виробках із складною геометрією.

### Результати досліджень

Згідно з рекомендаціями [1], розглядалася побудова моделі розповсюдження пружної хвилі через електроакустичний тракт, яка складається з трьох частин, як показано на рис. 1.

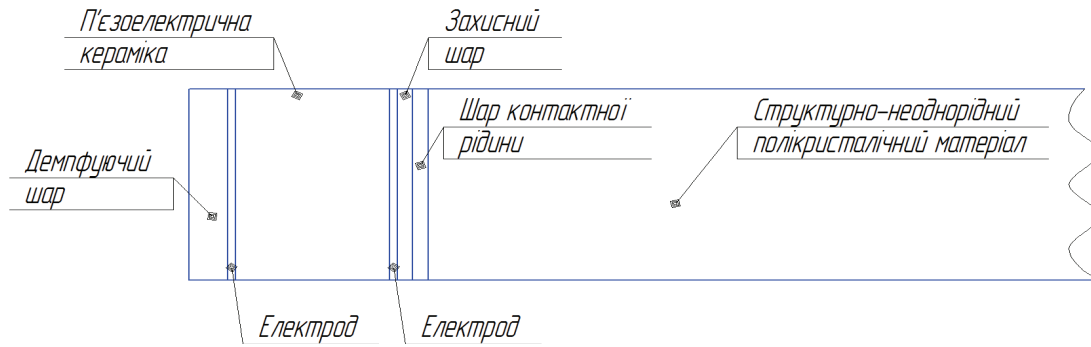


Рис. 1. Модель електроакустичного тракту

В першій частині розглядається розповсюдження пружних хвиль через п'єзоелектричну кераміку, для чого використовується система з трьох рівнянь:

$$\begin{cases} \rho \frac{d\nu}{dt} = \frac{d\sigma}{dx}; \\ \frac{d\sigma}{dt} = c_{33} \frac{d\nu}{dx} - e_{33} \frac{dE}{dt}; \\ i = \psi E + \varepsilon_3 \frac{dE}{dt} + e_{33} \frac{d\nu}{dx}, \end{cases} \quad (5)$$

де  $\rho$  — щільність п'єзокераміки;  $\nu$  — коливальна швидкість;  $\sigma$  — механічна напруга;  $c_{33}$  — пружна жорсткість;  $e_{33}$  — п'єзоконстанта;  $E$  — напруженість електричного поля;  $\psi$  — провідність матеріалу п'єзокераміки;  $\varepsilon_3$  — діелектрична проникність.

В другій частині розглядається розповсюдження пружних хвиль через електроди, захисний шар, демпфуючий шар та шар контактної рідини, для чого використовується модель Кельвіна-Фойгта в вигляді

$$\sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) = E\varepsilon + \eta\dot{\varepsilon}. \quad (6)$$

Відомо, що відносна деформація

$$\varepsilon = dU/dx, \quad (7)$$

де  $U$  — зміщення структурно-неоднорідного полікристалічного матеріалу.

Також відомо, що швидкість

$$\nu = dU/dt. \quad (8)$$

Підставляючи в формулу (6) рівняння (7) та (8) отримаємо, що

$$\frac{d\sigma}{dt} = E \frac{d\nu}{dx} + \eta \frac{d^2\nu}{dxdt}. \quad (9)$$

В третій частині розглядається розповсюдження пружних хвиль через безпосередньо полікристалічний матеріал для чого використовуються моделі гістерезису тертя (2) і (3) та гістерезису відриву (2) і (4). Підставляючи в формули (2), (3) та (4) рівняння (7) та (8), отримаємо, що для гістерезису тертя

$$\frac{d\sigma}{dt} = E \frac{d\nu}{dx} - E \left( \alpha \varepsilon_0 \frac{d\nu}{dx} + \begin{cases} 0,5\beta_1 \frac{d}{dt} \left( \nu \frac{dt}{dx} \right)^2, & \dot{\varepsilon} > 0; \\ -0,5\beta_2 \frac{d}{dt} \left( \nu \frac{dt}{dx} \right)^2, & \dot{\varepsilon} < 0, \end{cases} \right) \quad (10)$$

а для гістерезису відриву

$$\frac{d\sigma}{dt} = E \frac{dv}{dx} - E \left\{ \begin{array}{l} 0,5\gamma_1 \frac{d}{dt} \left( v \frac{dt}{dx} \right)^2, \quad \varepsilon > 0, \dot{\varepsilon} > 0; \\ -0,5\gamma_2 \frac{d}{dt} \left( v \frac{dt}{dx} \right)^2 + 0,5(\gamma_1 + \gamma_2) \varepsilon_0^+ \frac{dv}{dx}, \quad \varepsilon > 0, \dot{\varepsilon} < 0; \\ -0,5\gamma_3 \frac{d}{dt} \left( v \frac{dt}{dx} \right)^2, \quad \varepsilon < 0, \dot{\varepsilon} < 0; \\ 0,5\gamma_4 \frac{d}{dt} \left( v \frac{dt}{dx} \right)^2 + 0,5(\gamma_3 + \gamma_4) \varepsilon_0^- \frac{dv}{dx}, \quad \varepsilon < 0, \dot{\varepsilon} > 0. \end{array} \right. \quad (11)$$

Рівняння (5), (9) та (10) або (11) пов'язують між собою механічну напругу  $\sigma$  та коливальну швидкість  $v$ . Тобто, якщо перейти від диференціалів до прирощень, то ці рівняння пов'язують між собою зміну механічної напруги  $\Delta\sigma$  та зміну коливальної швидкості  $\Delta v$ . Наприклад, рівняння (10) перетворюється на рівняння

$$\frac{\Delta\sigma}{\Delta t} = E \frac{\Delta v}{\Delta x} - E \left( \alpha \varepsilon_0 \frac{\Delta v}{\Delta x} + \left\{ \begin{array}{l} 0,5\beta_1 \frac{\Delta}{\Delta t} \left( v \frac{\Delta t}{\Delta x} \right)^2, \quad \dot{\varepsilon} > 0; \\ -0,5\beta_2 \frac{\Delta}{\Delta t} \left( v \frac{\Delta t}{\Delta x} \right)^2, \quad \dot{\varepsilon} < 0, \end{array} \right. \right) \quad (12)$$

а рівняння (11) перетворюється на рівняння

$$\frac{\Delta\sigma}{\Delta t} = E \frac{\Delta v}{\Delta x} - E \left\{ \begin{array}{l} 0,5\gamma_1 \frac{\Delta}{\Delta t} \left( v \frac{\Delta t}{\Delta x} \right)^2, \quad \varepsilon > 0, \dot{\varepsilon} > 0; \\ -0,5\gamma_2 \frac{\Delta}{\Delta t} \left( v \frac{\Delta t}{\Delta x} \right)^2 + 0,5(\gamma_1 + \gamma_2) \varepsilon_0^+ \frac{\Delta v}{\Delta x}, \quad \varepsilon > 0, \dot{\varepsilon} < 0; \\ -0,5\gamma_3 \frac{\Delta}{\Delta t} \left( v \frac{\Delta t}{\Delta x} \right)^2, \quad \varepsilon < 0, \dot{\varepsilon} < 0; \\ 0,5\gamma_4 \frac{\Delta}{\Delta t} \left( v \frac{\Delta t}{\Delta x} \right)^2 + 0,5(\gamma_3 + \gamma_4) \varepsilon_0^- \frac{\Delta v}{\Delta x}, \quad \varepsilon < 0, \dot{\varepsilon} > 0. \end{array} \right. \quad (13)$$

Відомо, що в залежності від необхідної похибки обчислень, може застосовуватися різна скінченно-різницева схема, яка використовує різну кількість вузлів. Згідно з рекомендація [5], була застосована схема обчислень  $5x + 3t$ . Вона означає, що для обчислення похідних по координаті  $x$  застосовується апроксимація по п'яти вузлах, а для обчислення похідних по часу  $t$  застосовується апроксимація по трьох вузлах.

Розрахунки велися для випадку, коли на п'єзокерамічний перетворювач подається пакет з  $N = 20 \dots 50$  електричних коливань на основній частоті  $f = 90,0$  кГц, який дозволяє створити в структурно-неоднорідному полікристалічному матеріалі максимальну відносну деформацію  $\varepsilon \approx 1,0 \cdot 10^{-6}$ . З метою зменшення похибки обчислень, крок  $\Delta x$  складав:

$$\Delta x = \lambda/40 = 0,05 \text{ м}/40 = 0,00125 \text{ м} \rightarrow 1,0 \text{ мм}, \quad (14)$$

де  $\lambda$  — довжина хвилі на частоті  $f = 90,0$  кГц;  $\lambda \approx 0,05$  м.

Також для забезпечення стійкості алгоритму СРЧО крок  $\Delta t$  було обрано таким:

$$\Delta t = \Delta x / (2c) = 0,001 \text{ м} / (2 \cdot 4500 \text{ м/с}) = 1,11 \cdot 10^{-7} \text{ с} \rightarrow 0,1 \text{ мкс}, \quad (15)$$

де  $c$  — максимальна швидкість пружної хвилі,  $c = 4500$  м/с.

За п'єзокерамічний елемент було вибрано VA-550 (ЦТС-19М) від виробника «Аврора-Елма» (Росія). Як полікристалічний матеріал застосовувався сплав мідно-цинковий ЛС59-1. Інші складові електроакустичного тракту наведені в табл.

## Складові електроакустичного тракту

Складові	Матеріал	Товщина	Щільність	Модуль Юнга	В'язкість
Демпфуючий шар	Смола ТП-20	10,0 мм	1100 кг/м <sup>3</sup>	3,2 ГПа	1200 Па/с
Електроди	Нікель	0,1 мм	8900 кг/м <sup>3</sup>	210 ГПа	18,5 Па/с
Захисний шар	Кераміка SiO <sub>2</sub>	1,5 мм	2600 кг/м <sup>3</sup>	90 ГПа	300 Па/с
Шар контактної рідини	Масило 15W-40	0,1 мм	880 кг/м <sup>3</sup>	2,5 ГПа	100 Па/с

Моделювання розповсюдження пружної хвилі через сплав мідно-цинковий ЛС59-1 виконувалося за різних значень нелінійних параметрів  $\alpha$  та  $\beta_1, \beta_2$ , а також  $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$ . Наприклад, на графіку 1 (рис. 2) показано розповсюдження пружної хвилі, якщо  $\alpha = 300$ ,  $\beta_1 = 600$  та  $\beta_2 = 600$ , а на графіку 2 показано розповсюдження пружної хвилі, коли  $\gamma_1 = 2400$ ,  $\gamma_2 = 4800$ ,  $\gamma_3 = 2400$ ,  $\gamma_4 = 4800$ .

З графіків 1 та 2 на рис. 2 добре видно, що в процесі розповсюдження форма пружної хвилі спотворюється і наближається до трикутної. Таке явище характерне для амплітудно-залежного внутрішнього тертя, яке спостерігається в полікристалічних матеріалах. В результаті проведення багатократного моделювання розповсюдження пакетів гармонійних коливань з амплітудами від  $\varepsilon \approx 1,0 \cdot 10^{-8}$  до  $\varepsilon \approx 1,0 \cdot 10^{-5}$  через структурно-неоднорідний полікристалічний матеріал за різних значень нелінійних параметрів  $\alpha$  та  $\beta_1, \beta_2$ , а також  $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$  було зафіксовано явище амплітудно-залежної зміни  $\Delta k/k$  коефіцієнта поглинання  $k$  пружної хвилі, причому в більшості випадків уразі збільшення нелінійних параметрів коефіцієнт поглинання  $k$  пружної хвилі зменшувався.

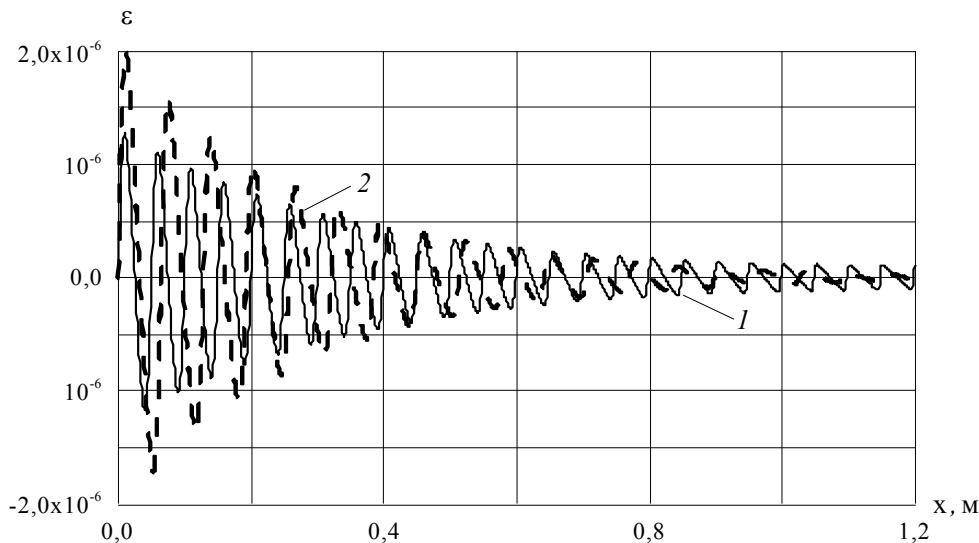
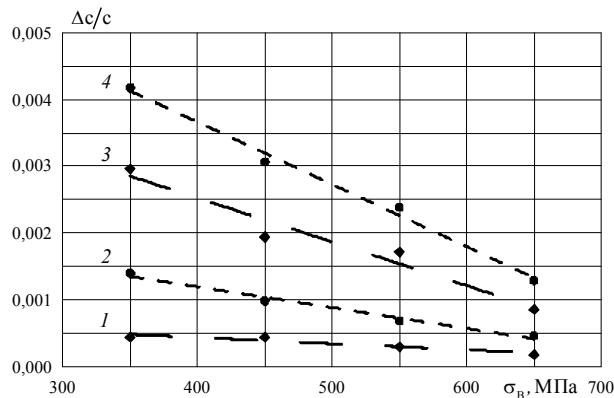


Рис. 2. Розповсюдження коливань через полікристалічний матеріал:  
1 — гістерезис тертя; 2 — гістерезис відриву

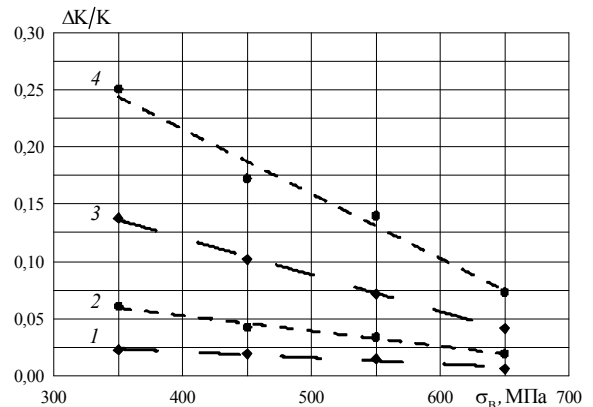
Крім цього, було зафіксоване явище амплітудно-залежної зміни  $\Delta c/c$  швидкості  $c$  пружної хвилі, причому в більшості випадків зі збільшенням нелінійних параметрів швидкість  $c$  пружної хвилі зменшувалася.

Зміна  $\Delta k/k$  коефіцієнта поглинання  $k$  становила не більше (5...10)% за типового значення (1...3)%. Відповідно, зміна  $\Delta c/c$  швидкості  $c$  становила не більше (1...2)% за типового значення (0,1...0,2)%. Це дозволяє говорити про приблизно на один порядок більшу чутливість полікристалічного матеріалу до зміни  $\Delta k/k$  коефіцієнта поглинання  $k$ , ніж до зміни  $\Delta c/c$  швидкості  $c$ . Експериментальні дослідження, проведені з використанням розроблених і створених акустичних

засобів вимірювання [6, 7] та розривної машини УМ-5, підтвердили існування залежностей між межею міцності при розриві  $\sigma_B$  сплаву мідно-цинкового ЛС59-1 та змінами  $\Delta k/k$  і  $\Delta c/c$ , які показані на рис. 3 та на рис. 4 [8].

Рис. 3. Зміна  $\Delta c/c$  при  $f = 90$  кГц :

- 1 —  $T = +20$  °C,  $\varepsilon_0 = 10^{-6}$ ; 2 —  $T = +150$  °C,  $\varepsilon_0 = 10^{-6}$ ;  
3 —  $T = +20$  °C,  $\varepsilon_0 = 10^{-5}$ ; 4 —  $T = +150$  °C,  $\varepsilon_0 = 10^{-5}$

Рис. 4. Зміна  $\Delta K/K$  при  $f = 90$  кГц :

- 1 —  $T = +20$  °C,  $\varepsilon_0 = 10^{-6}$ ; 2 —  $T = +150$  °C,  $\varepsilon_0 = 10^{-6}$ ;  
3 —  $T = +20$  °C,  $\varepsilon_0 = 10^{-5}$ ; 4 —  $T = +150$  °C,  $\varepsilon_0 = 10^{-5}$

Математичне моделювання проходження через структурно-неоднорідний полікристалічний матеріал пружної хвилі із застосуванням скінченно-різницевого методу у часовій області (СРЧО) показало відносно непогане узгодження із експериментальними даними. Розходження становить не більше (10...20)%, що пов'язано із технологічними відхиленнями товщини, щільності, лінійного модуля пружності та інших параметрів електроакустичного тракту від прийнятих в розрахунках значень.

### Висновки

1. Існує певний зв'язок між такими величинами: з одного боку, із фізико-механічними характеристиками структурно-неоднорідних полікристалічних матеріалів, зокрема, межею міцності при розриві  $\sigma_B$ ; з іншого боку, зі зміною  $\Delta k/k$  коефіцієнта поглинання  $k$  та зміною  $\Delta c/c$  швидкості  $c$  пружної хвилі.

2. Зміни  $\Delta k/k$  коефіцієнта поглинання  $k$  та  $\Delta c/c$  швидкості  $c$  пружної хвилі в усьому діапазоні зміни нелінійних параметрів  $\alpha$  та  $\beta_1, \beta_2$ , а також  $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$  є дуже невеликими і не перевищують в більшості випадків кількох відсотків. Тому для їх вимірювання необхідно застосування технічних засобів із високою роздільною здатністю.

3. На зміну  $\Delta k/k$  коефіцієнта поглинання  $k$  та  $\Delta c/c$  швидкості  $c$  пружної хвилі впливає не тільки межа міцності при розриві  $\sigma_B$ , але й амплітуда відносної деформації  $\varepsilon$ , температура  $T$  полікристалічного матеріалу, частота  $f$  пружної хвилі та деякі інші. Тому існує необхідність в тому, щоб побудувати модель взаємодії полікристалічного матеріалу та пружної хвилі у вигляді повного або дробового факторного плану із застосуванням двох або кількох рівнів факторів.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Бархатов В. А. Электромеханическая модель пьезопреобразователя / В. А. Бархатов // Дефектоскопия. — 2011. — № 8. — С. 3—15.
2. Волновые процессы в средах с гистерезисной нелинейностью. Часть I / [В. Е. Назаров, А. В. Радостин, Л. А. Островский, И. А. Соустова] // Акустический журнал. — 2003. — Т. 49, № 3. — С. 405—415.
3. Волновые процессы в средах с гистерезисной нелинейностью. Часть II / [В. Е. Назаров, А. В. Радостин, Л. А. Островский, И. А. Соустова] // Акустический журнал. — 2003. — Т. 49, № 4. — С. 529—534.
4. Осинцев О. Е. Медь и медные сплавы. Отечественные и зарубежные марки : справочник / О. Е. Осинцев, В. Н. Фёдоров. — М. : Машиностроение, 2004. — 336 с. — ISBN 5-217-03220-0.
5. Бархатов В. А. Решение динамических задач акустики методом конечных разностей во временной области. Основные соотношения. Анализ погрешностей // Дефектоскопия. — 2005. — № 3. — С. 12—26.

6. Патент № 34594 А. Україна. МПК G01H 5/00, G01N 29/00, G01N 29/07. Спосіб визначення залежності швидкості розповсюдження акустичних коливань від їх інтенсивності і пристрій для його здійснення. — Державна академія легкої промисловості України; Скрипник Ю. О., Лісовець С. М. — № 98052678; заявл. 22.05.1998; опубл. 15.03.2001, Бюл. № 2.

7. Патент № 57892. Україна. МПК G01F 23/28. Пристрій для вимірювання нелінійності акустичних 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.

8. Лісовець С. М. Оптимізація акустичного контролю структурно-неоднорідних полікристалічних матеріалів методами планування експериментів / С. М. Лісовець // Вісник КНУТД. — 2013. — № 3. — С. 34—41.

Рекомендована кафедрою радіотехніки ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 12.11.2013

**Здоренко Валерій Георгійович** — д-р техн. наук, професор, e-mail: alzd@meta.ua, **Лісовець Сергій Миколайович** — асистент, e-mail: ser\_lis@voliacable.com.

Кафедра автоматизації та систем управління, Київський національний університет технологій та дизайну, Київ

V. G. Zdorenko<sup>1</sup>  
S. N. Lisovets<sup>1</sup>

## APPLICATION OF METHOD OF EVENTUAL DIFFERENCES IN TEMPORARY AREA FOR CONTROL OF STRUCTURAL- HETEROGENEOUS POLYCRYSTALLINE MATERIALS

<sup>1</sup>Kyiv National University of Technologies and Design

*Possibility of application of eventual-difference method in temporary area (EDTA) is examined for the calculation of passing through structural-heterogeneous polycrystalline material of resilient wave that allows on the nonlinear change of its parameters, such as peak-dependent absorption and speed, to control physical-mechanical properties of such material, in particular its durability.*

**Keywords:** eventual-difference method, structurally-heterogeneous polycrystalline material, protective layer, antivibration layer, double-layer chart of calculations

**Zdorenko Valery G.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, e-mail: alzd@meta.ua, **Lisovets Sergiy N.** — Assistant, e-mail: ser\_lis@voliacable.com.

The Chair of computer and automation systems

В. Г. Здоренко<sup>1</sup>  
С. Н. Лисовець<sup>1</sup>

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ РАЗНОСТЕЙ ВО ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ СТРУКТУРНО- НЕОДНОРОДНЫХ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

<sup>1</sup>Київський національний університет технологій та дизайну

*Рассматривается возможность применения конечно-разностного метода во временной области (КРВО) для расчёта прохождения через структурно-неоднородный поликристаллический материал упругой волны, что позволяет по нелинейному изменению её параметров, таких как амплитудно-зависимые коэффициент поглощения и скорость, контролировать физико-механические свойства этого материала, в частности его прочность.*

**Ключевые слова:** конечно-разностный метод, структурно-неоднородный поликристаллический материал, защитный слой, демпфирующий слой, двухслойная схема вычислений.

**Здоренко Валерий Георгиевич** — д-р тех. наук, профессор, e-mail: alzd@meta.ua, **Лисовець Сергей Николаевич** — ассистент, e-mail: ser\_lis@voliacable.com.

Кафедра автоматизации и компьютерных систем