

УДК 534.08

С.М. ЛІСОВЕЦЬ

Київський національний університет технологій та дизайну

ВПЛИВ МІЦНІСТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРУКТУРНО НЕОДНОРІДНИХ ПОЛІКРИСТАЛІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ПАРАМЕТРИ ПРУЖНОЇ ХВИЛІ ТА НА КОЕФІЦІЄНТИ НЕЛІНІЙНОСТЕЙ ГІСТЕРЕЗИСНИХ МОДЕЛЕЙ

Розглянуто, яким чином параметри двох основних гістерезисних моделей тертя та відриву, що описують розповсюдження пружних хвиль в структурно неоднорідних полікристалічних матеріалах, функціонально пов'язані із характеристиками міцності цих матеріалів.

Ключові слова: полікристалічний матеріал, гістерезисна модель, міжзеренна границя.

Для опису взаємодії поздовжньої пружної (тобто акустичної) хвилі, яка розповсюджується через полікристалічний матеріал, із цим матеріалом застосовуються дві основні гістерезисні моделі (тертя та відриву), що досить адекватно описують цей процес. Так як в реальних зразках полікристалічних матеріалів отримати суто поздовжні пружні хвилі часто досить важко, то ці ж самі моделі також підходять для опису пружних хвиль в вигляді пучків, що дифрагують, кут розходження яких не перевищує кількох градусів. Полікристалічні матеріали за своєю будовою є структурно неоднорідними середовищами.

Якщо з точки зору акустики спрощено розглянути будову полікристалічних матеріалів, то можна визначити, що вони складаються з окремих монокристалів (зерен), що мають довільну орієнтацію та розмір. Між монокристалами (зернами) знаходяться міжзеренні проміжки, орієнтація та розмір яких пов'язані із орієнтацією та розміром окремих монокристалів (зерен).

При розповсюдженні через полікристалічний матеріал поздовжньої пружної хвилі в ньому виникають поздовжні та поперекові механічні напруги, пов'язані із періодичним стисненням та розтягненням полікристалічного матеріалу. В загальному випадку механічні напруги пов'язані із відносними деформаціями полікристалічного матеріалу (при невеликих деформаціях $\varepsilon \approx 10^{-8} \dots 10^{-7}$) відомим законом Гука:

$$\sigma = E\varepsilon, \quad (1)$$

де σ – механічна напруга, ε – відносна деформація, E – коефіцієнт пропорційності (модуль Юнга).

Зробимо спробу розглянути границю між монокристалами (зернами) в полікристалічному матеріалі [3, 4]. Нехай при проходженні поздовжньої пружної хвилі в полікристалічному матеріалі вона викликає безпосередньо в монокристалах (зернах) відносну деформацію $\varepsilon_{M.K}$. При цьому в монокристалах (зернах) виникають механічні напруги $\sigma_{M.K}$:

$$\sigma_{M.K} = E_{M.K}\varepsilon_{M.K}. \quad (2)$$

Такі ж самі механічні напруги $\sigma_{M.G}$ виникають в міжзеренній границі:

$$\sigma_{M.G} = \sigma_{M.K}. \quad (3)$$

Звідси відносна деформація міжзеренної границі:

$$\varepsilon_{M.G} = \sigma_{M.G} / E_{M.G} . \quad (4)$$

З рівнянь (2) та (4) отримуємо:

$$\varepsilon_{M.G} = \varepsilon_{M.K} E_{M.K} / E_{M.G} . \quad (5)$$

Область міжзеренної границі шириною від кількох десятків до кількох сотень атомних шарів відрізняється від області монокристалів (зерен) як за структурою, так і за складом. В області міжзеренної границі більшість фізичних процесів, пов'язаних із появою та зникненням дефектів (таких, як виділення нових фаз, утворення та розвиток тріщин, дифузний масопереніс та інші), притікають інакше, ніж в області монокристалів (зерен). Тому міцність міжзеренної границі у кілька раз менша, ніж міцність безпосередньо монокристалів (зерен). Модуль Юнга міжзеренної границі $E_{M.G}$ в декілька раз менший модуля Юнга монокристалів (зерен) $E_{M.K}$. Тобто виконується співвідношення

$$E_{M.G} / E_{M.K} \approx 0,02 \dots 0,05 . \quad (6)$$

З рівнянь (5) та (6) отримуємо:

$$\varepsilon_{M.G} = (2 \dots 50) \varepsilon_{M.K} . \quad (7)$$

Крім того, міжзеренна границя може мати такі дефекти структури або складу, коли її $E_{M.G}$ менший модуля Юнга монокристалів (зерен) $E_{M.K}$ навіть у декілька сотень раз.

Отже, при розповсюдженні поздовжньої пружної хвилі в полікристалічному матеріалі, якщо безпосередньо в монокристалах (зернах) вона викликає відносну деформацію $\varepsilon_{M.K} = 10^{-7} \dots 10^{-6}$, то в міжзеренній границі вона вже може викликати відносну деформацію $\varepsilon_{M.G} = 2 \cdot 10^{-7} \dots 5 \cdot 10^{-5}$. Відносні деформації більше 10^{-5} для більшості полікристалічних матеріалів є екстремально високими. Такі деформації викликають в області міжзеренної границі відхилення від закону Гука (1) та спотворення форми поздовжньої пружної хвилі. Внаслідок підвищених втрат енергії поздовжньої пружної хвилі в області міжзеренної границі виникають такі нелінійні акустичні ефекти, як амплітудна залежність коефіцієнта затухання поздовжньої пружної хвилі та зміна її фазової швидкості. Внаслідок спотворення форми хвилі виникає генерація вищих гармонійних складових. Виникають також такі нелінійні акустичні ефекти, як різна залежність між механічною напругою $\sigma_{M.G}$ та відносною деформацією $\varepsilon_{M.G}$ в залежності від того, розтягнутий полікристалічний матеріал чи стиснутий, а також в залежності від того, розтягується в даний час полікристалічний матеріал чи стискається. Тобто в наявності є гістерезисний характер залежності між $\sigma_{M.G}$ та $\varepsilon_{M.G}$. Такі нелінійні акустичні ефекти описуються за допомогою гістерезисних моделей [3, 4], з яких найбільше застосування знайшли гістерезисна модель тертя та гістерезисна модель відриву. Наведені вище нелінійні акустичні ефекти є дуже складними, залежать від багатьох факторів та для кожного з полікристалічних матеріалів є індивідуальними. Також відомо, що параметри міжзеренної границі суттєво впливають на міцнісні характеристики структурно неоднорідних полікристалічних матеріалів (наприклад, на межу міцності при розриві) [5–7].

Це пов'язано з тим, що міжзеренна границя має відхилення у будові кристалічної структури та має у своєму складі багато інших включень та домішок.

Об'єкти та методи дослідження

Об'єктом дослідження є процеси взаємодії поздовжньої пружної хвилі із структурно неоднорідними полікристалічними матеріалами, що досліджуються, з метою визначення впливу міцнісних характеристик полікристалічних матеріалів на параметри поздовжньої пружної хвилі. Досі ще не створена єдина теорія нелінійної взаємодії структурно неоднорідного середовища та пружної хвилі. Як правило, рівняння стану таких середовищ є неаналітичними, тобто негладкими та такими, що не диференціюються. При застосуванні моделі гістерезису третя залежність між σ та ε має вид системи із двох рівнянь [3, 4]:

$$\sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) = E \left(\varepsilon - \alpha \varepsilon_m \varepsilon + \begin{cases} 0,5\beta_1 \varepsilon^2 - 0,25(\beta_1 + \beta_2) \varepsilon_m^2 & \dot{\varepsilon} > 0 \\ -0,5\beta_2 \varepsilon^2 + 0,25(\beta_1 + \beta_2) \varepsilon_m^2 & \dot{\varepsilon} < 0 \end{cases} \right). \quad (8)$$

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

При застосуванні моделі гістерезису залежність між σ та ε має вигляд вже системи із чотирьох рівнянь [3, 4]:

$$\sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) = E \left(\varepsilon - \begin{cases} 0,5\gamma_1 \varepsilon^2 & \varepsilon > 0, \dot{\varepsilon} > 0 \\ -0,5\gamma_2 \varepsilon^2 + 0,5(\gamma_1 + \gamma_2) \varepsilon_m^+ \varepsilon & \varepsilon > 0, \dot{\varepsilon} < 0 \\ -0,5\gamma_3 \varepsilon^2 & \varepsilon < 0, \dot{\varepsilon} < 0 \\ 0,5\gamma_4 \varepsilon^2 + 0,5(\gamma_3 + \gamma_4) \varepsilon_m^- \varepsilon & \varepsilon < 0, \dot{\varepsilon} > 0 \end{cases} \right). \quad (9)$$

Тут γ_1 , γ_2 , γ_3 , γ_4 – нелінійні параметри; ε_m^+ – амплітуда відносної деформації позитивної напівхвилі; ε_m^- – амплітуда відносної деформації негативної напівхвилі. Параметри ε_m , ε_m^+ та ε_m^- не є характеристиками полікристалічного матеріалу, а визначаються лише його мінімальною та максимальною відносною деформаціями [3, 4]. Характер залежності між σ та ε визначається доволі просто: на невеликих відстанях від електроакустичного випромінювача для структурно неоднорідних полікристалічних матеріалів з квадратичною гістерезисною нелінійністю амплітуди всіх вищих гармонік (тобто ε_2 , ε_3 і так далі) пружної хвилі пропорційні квадрату амплітуди першої гармоніки (тобто ε_1) основної пружної хвилі [3, 4]; для полікристалічних матеріалів з кубічною гістерезисною нелінійністю та ж сама залежність між σ та ε є кубічною. Для гістерезису третя нелінійні параметри α , β_1 та β_2 знаходяться в однозначній залежності від нелінійного декременту δ затухання, відносної зміни $\Delta c/c$ фазової швидкості та амплітуди ε_2 другої гармоніки пружної хвилі [3, 4]. Наприклад, знаючи ε_0 та точно помірявши $\Delta c/c$ як відносну зміну швидкості c пружної хвилі (зазвичай $\Delta c/c$ складає $\leq 1\%$), можна визначити α :

$$\alpha = \frac{2}{\varepsilon_0} \frac{\Delta c}{c}. \quad (10)$$

Тоді, точно помірявши нелінійний декремент δ як зміну коефіцієнта K затухання пружної хвилі (зазвичай $\Delta K/K$ складає $\leq 1\%$), можна знайти суму коефіцієнтів $\beta_1 + \beta_2$:

$$\beta_1 + \beta_2 = \frac{3}{2\varepsilon_0} \delta. \quad (11)$$

Далі, знаючи амплітуду другої гармоніки $\varepsilon_2(x)|_{x=const}$, можна знайти різницю $\beta_1 - \beta_2$:

$$\beta_1 - \beta_2 = \frac{\varepsilon_2(x)}{\frac{1}{8}\varepsilon_0^2 kx - \frac{(\beta_1 + \beta_2)}{24\pi}\varepsilon_0^3 k^2 x^2} \Big|_{x=const}. \quad (12)$$

Знайдені комбінації нелінійних параметрів α , $\beta_1 + \beta_2$ та $\beta_1 - \beta_2$ входять в аналітичний розв'язок [3, 4] для $\varepsilon(x, t)$ та дозволяють однозначно визначити розповсюдження пружної хвилі.

Для гістерезису відриву нелінійні параметри γ_1 , γ_2 , γ_3 та γ_4 також знаходяться в однозначній залежності від нелінійного декременту δ затухання, відносної зміни $\Delta c/c$ фазової швидкості, амплітуди ε_2 та фази φ_2 другої гармоніки пружної хвилі [3, 4]. Необхідно також зауважити, що в багатьох випадках при досить невеликих амплітудах ε_0 пружної хвилі зміна як $\Delta c/c$, так і $\Delta K/K$ становить приблизно однакові величини, тобто для контролю структурно неоднорідного середовища можна з успіхом використовувати як $\Delta c/c$, так і $\Delta K/K$.

Постановка завдання

У цьому випадку інтерес представляють структурно неоднорідні полікристалічні матеріали, міцнісні характеристики яких можуть змінюватися під впливом різних чинників. Наприклад, ще на стадії виробництва, або ж в процесі експлуатації. До таких полікристалічних матеріалів відносяться як хімічно чисті метали (так звані «м'які» метали мідь, цинк, свинець), так і їх сплави (латуні, бронзи). Відомо, що міцнісні характеристики полікристалічних матеріалів залежать від багатьох факторів, але в тому числі і від параметрів міжзеренної границі [6, 7]. Тому робиться припущення, що зміна міцнісних характеристик полікристалічних матеріалів приводить до зміни параметрів поздовжньої пружної хвилі при проходженні її через полікристалічний матеріал, що досліджується. Відомо, що при розповсюдженні через структурно неоднорідні середовища пружних хвиль виникає багато різних акустичних ефектів, в тому числі і нелінійних [6, 7]. З них найбільш чутливі до зміни параметрів таких середовищ є два ефекти, які нас цікавлять: зміна коефіцієнта затухання $\Delta K/K$ основної (першої) гармоніки пружної хвилі та зміна фазової швидкості $\Delta c/c$ основної (першої) гармоніки пружної хвилі.

Результати та їх обговорення

В результаті виконання моделювання взаємодії поздовжньої пружної хвилі із структурно неоднорідними полікристалічними матеріалами, що досліджуються, було виявлено наступне.

Розглянемо модель гістерезису тертя, до складу якої входять нелінійні параметри α , β_1 та β_2 . З одного боку моделювання за формулою (8) показує, що при зміні нелінійного параметра α зміни

коефіцієнта згасання $\Delta K/K$ не відбувається. Також моделювання показує, що при зміні нелінійних параметрів β_1 та/або β_2 зміни фазової швидкості $\Delta c/c$ теж не відбувається.

З іншого боку, моделювання за формулою (8) показує, що при зміні нелінійного параметра α спостерігається збільшення зміни коефіцієнта згасання $\Delta K/K$ (див. рис. 1, а), причому ці функціональні залежності близькі до лінійних. Також моделювання показує, що при зміні нелінійних параметрів β_1 та/або β_2 також спостерігається збільшення зміни фазової швидкості $\Delta c/c$ (див. рис. 1, б), причому ці функціональні залежності також близькі до лінійних.

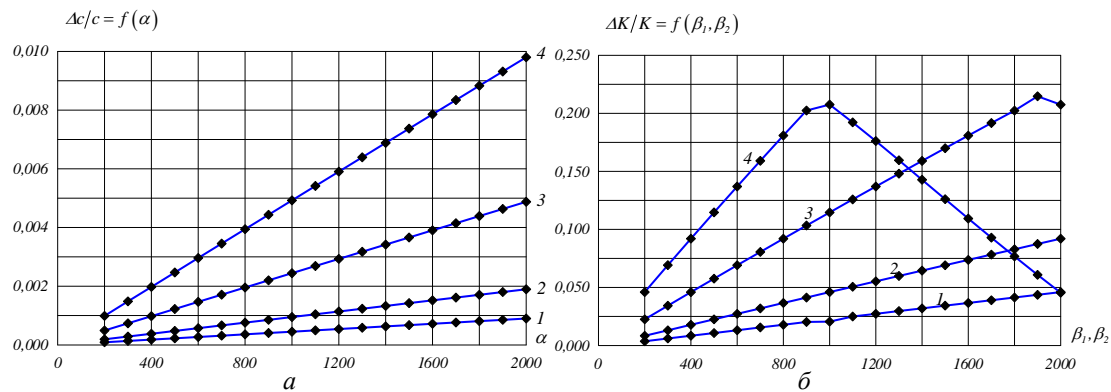


Рис. 1. а – $\Delta c/c = f(\alpha)$: 1 – $\varepsilon_0 = 0,1 \cdot 10^{-5}$, 2 – $\varepsilon_0 = 0,2 \cdot 10^{-5}$, 3 – $\varepsilon_0 = 0,5 \cdot 10^{-5}$, 4 – $\varepsilon_0 = 1,0 \cdot 10^{-5}$;

б – $\Delta K/K = f(\beta_1, \beta_2)$: 1 – $\varepsilon_0 = 0,1 \cdot 10^{-5}$, 2 – $\varepsilon_0 = 0,2 \cdot 10^{-5}$, 3 – $\varepsilon_0 = 0,5 \cdot 10^{-5}$, 4 – $\varepsilon_0 = 1,0 \cdot 10^{-5}$

Розглянемо тепер модель гістерезису відриву, до складу якої входять нелінійні параметри $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ та γ_4 . Моделювання за формулою (9) показує, що при зміні нелінійних параметрів $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ та γ_4 відбувається як збільшення зміни коефіцієнта згасання $\Delta K/K$ (див. рис. 2, а), так і збільшення зміни фазової швидкості $\Delta c/c$ (див. рис. 2, б), причому ці функціональні залежності також близькі до лінійних. Порівняння залежностей, показаних на рис. 1, 2 показує, що для обох гістерезисних моделей як зміна $\Delta K/K$, так і зміна $\Delta c/c$ мають приблизно однаковий порядок, тому контроль міцністних характеристик структурно неоднорідних полікристалічних матеріалів можна виконувати як за зміною $\Delta K/K$, так і за зміною $\Delta c/c$ приблизно з однаковою роздільною здатністю.

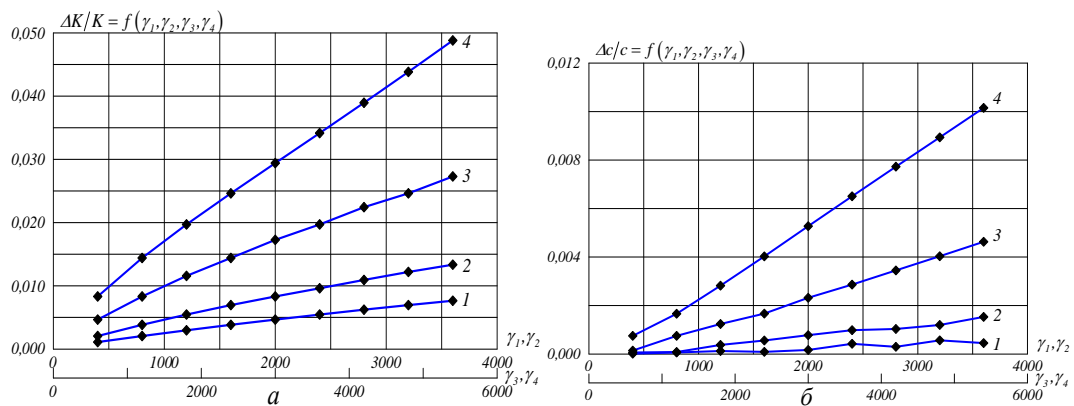


Рис. 2. а – $\Delta K/K = f(\gamma_1, \gamma_2)$: 1 – $\varepsilon_0 = 0,1 \cdot 10^{-5}$, 2 – $\varepsilon_0 = 0,2 \cdot 10^{-5}$, 3 – $\varepsilon_0 = 0,5 \cdot 10^{-5}$, 4 – $\varepsilon_0 = 1,0 \cdot 10^{-5}$;

б – $\Delta c/c = f(\gamma_1, \gamma_2)$: 1 – $\varepsilon_0 = 0,1 \cdot 10^{-5}$, 2 – $\varepsilon_0 = 0,2 \cdot 10^{-5}$, 3 – $\varepsilon_0 = 0,5 \cdot 10^{-5}$, 4 – $\varepsilon_0 = 1,0 \cdot 10^{-5}$

З експериментальних даних [3, 4, 6, 7] відомо, що зміна часового опору (межі міцності при розриві) σ_B приводить в більшості випадків до зміни нелінійних параметрів α , β_1 та β_2 в гістерезисній моделі тертя та до зміни нелінійних параметрів γ_1 , γ_2 , γ_3 та γ_4 в гістерезисній моделі відриву. Тому можна функціонально пов'язати між собою через нелінійні параметри гістерезисних моделей часовий опір (межу міцності при розриві) σ_B і зміну $\Delta K/K$ та $\Delta c/c$.

Для моделі гістерезису тертя результати моделювання наведені на рис. 3. Як видно з рис. 3, а, збільшення часового опору (межі міцності при розриві) σ_B призводить до зменшення зміни фазової швидкості $\Delta c/c$ і навпаки. З рис. 3, б також видно, що збільшення часового опору (межі міцності при розриві) σ_B призводить до зменшення зміни коефіцієнта затухання $\Delta K/K$ і навпаки.

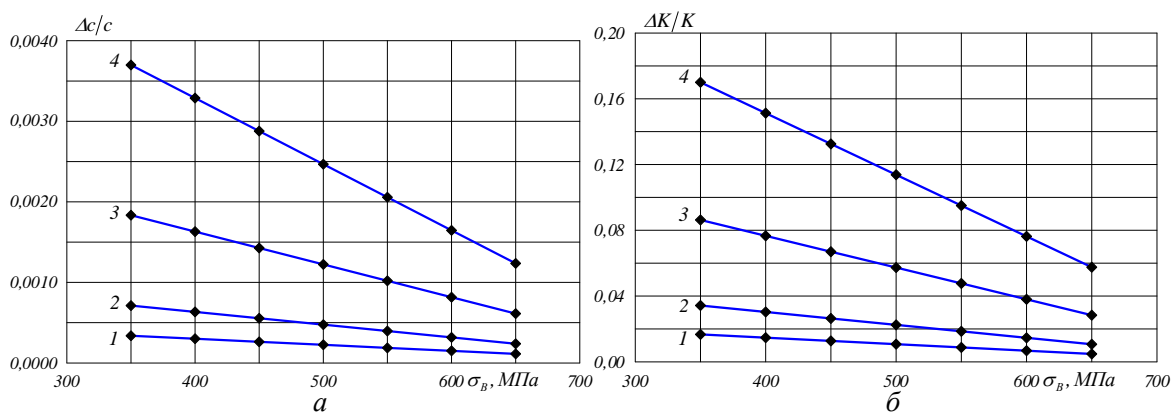


Рис. 3. а – $\Delta c/c = f(\sigma_B)$: 1 – $\epsilon_0 = 0,1 \cdot 10^{-5}$, 2 – $\epsilon_0 = 0,2 \cdot 10^{-5}$, 3 – $\epsilon_0 = 0,5 \cdot 10^{-5}$, 4 – $\epsilon_0 = 1,0 \cdot 10^{-5}$;

$$\text{б} - \Delta K/K = f(\sigma_B): 1 - \epsilon_0 = 0,1 \cdot 10^{-5}, 2 - \epsilon_0 = 0,2 \cdot 10^{-5}, 3 - \epsilon_0 = 0,5 \cdot 10^{-5}, 4 - \epsilon_0 = 1,0 \cdot 10^{-5}$$

Для моделі гістерезису відриву результати моделювання наведені на рис. 4 і в цілому співпадають із результатами моделі гістерезису тертя. Як видно з рис. 4, а, збільшення часового опору (межі міцності при розриві) σ_B призводить до зменшення зміни фазової швидкості $\Delta c/c$ і навпаки. З рис. 4, б також видно, що збільшення часового опору (межі міцності при розриві) σ_B призводить до зменшення зміни коефіцієнта затухання $\Delta K/K$ і навпаки.

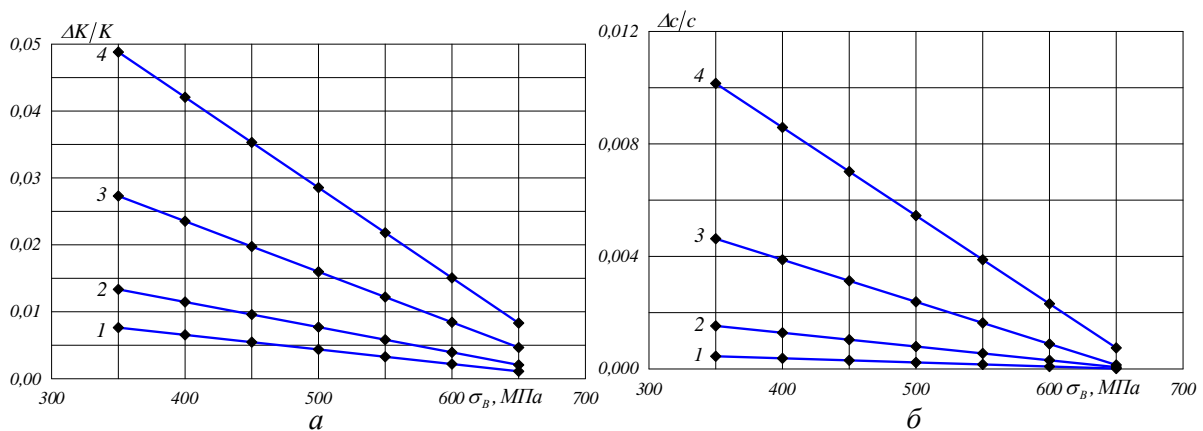


Рис. 4. а – $\Delta c/c = f(\sigma_B)$: 1 – $\epsilon_0 = 0,1 \cdot 10^{-5}$, 2 – $\epsilon_0 = 0,2 \cdot 10^{-5}$, 3 – $\epsilon_0 = 0,5 \cdot 10^{-5}$, 4 – $\epsilon_0 = 1,0 \cdot 10^{-5}$;

$$\text{б} - \Delta K/K = f(\sigma_B): 1 - \epsilon_0 = 0,1 \cdot 10^{-5}, 2 - \epsilon_0 = 0,2 \cdot 10^{-5}, 3 - \epsilon_0 = 0,5 \cdot 10^{-5}, 4 - \epsilon_0 = 1,0 \cdot 10^{-5}$$

Отримані залежності можна пояснити тим, що при збільшенні σ_B зростає міцність області міжзеренної границі, вона стає більш упорядкованою. Внаслідок цього зменшується спотворення поздовжньої пружної хвилі, що проходить через міжзеренні границі, і відповідно зменшується рівень нелінійних акустичних ефектів. Так як зміна $\Delta c/c$ та $\Delta K/K$ становить не більше (1...2)%, то для їх вимірювання необхідні методи з високою роздільною здатністю із невеликими власними нелінійними спотвореннями в акустичній та електричній частинах вимірювальної схеми. Тому для вимірювання $\Delta c/c$ можна запропонувати метод [8], а для вимірювання $\Delta K/K$ можна запропонувати метод [9].

Висновки

Контроль зміни фазової швидкості $\Delta c/c$ та коефіцієнта затухання $\Delta K/K$ дозволяє зв'язати їх із зміною часового опору (межі міцності при розриві) σ_B полікристалічного матеріалу однозначною функціональною залежністю, яка для кожного з структурно неоднорідних полікристалічних матеріалів є індивідуальною. Вимірюючи $\Delta c/c$ та $\Delta K/K$ з високою роздільною здатністю, можна з такою ж високою роздільною здатністю контролювати σ_B .

Список використаної літератури

1. Asano S. Theory of nonlinear damping due to dislocation hysteresis // J. Phys. Soc. Jap.–1970.– V. 29.– № 4.– P. 952–963.
2. Granato A., Lucke K. Theory of mechanical damping due to dislocation // J. Appl. Phys.–1956.– V. 27.– № 5.– P. 583–593.
3. Назаров В.Е., Радостин А.В., Островский Л.А., Соустова И.А. Волновые процессы в средах с гистерезисной нелинейностью. Часть I // Акустический журнал.– 2003. – Т. 49.– № 3.– С. 405–415.
4. Назаров В.Е., Радостин А.В., Островский Л.А., Соустова И.А. Волновые процессы в средах с гистерезисной нелинейностью. Часть II // Акустический журнал.– 2003.– Т. 49. – № 4.– С. 529–534.
5. Косевич В.М. и др. Структура межкристаллитных и межфазных границ.– М.: Металлургия, 1980. –256 с.
6. Зайцев В.Ю., Назаров В.Е., Турна В., Гусев В.Э., Кастаньеде Б. Экспериментальное исследование нелинейных акустических эффектов в зернистых средах // Акустический журнал.–2005.– Т. 51.– № 5.– С. 633–644.
7. Коробов А.И., Бражкин Ю.А., Ван Нин. Экспериментальные исследования упругой нелинейности в структурно-неоднородных материалах // Акустический журнал.–2005. – Т. 51.– № 5.– С. 663–671.
8. Патент № 34594 А. Україна. МПК G01N 5/00, G01N 29/00, G01N 29/07. Спосіб визначення залежності швидкості розповсюдження акустичних коливань від їх інтенсивності і пристрій для його здійснення.–Скрипник Ю.О., Лісовець С.М.–Заявл. 22.05.1998; Опубл. 15.03.2001, Бюл. № 2.
9. Патент № 42857. Україна. МПК G01N 29/11, G01N 29/22. Вимірювач нелінійності акустичного тракту.– Скрипник Ю.О., Лісовець С.М.– Заявл. 30.06.1998; Опубл. 15.11.2001, Бюл. № 10.

Стаття надійшла до редакції 21.12. 2012.

Влияние прочностных характеристик структурно неоднородных поликристаллических материалов на параметры упругой волны и на коэффициенты нелинейностей гистерезисных моделей

Лисовец С.Н.

Киевский национальный университет технологий и дизайна

Рассмотрено, каким образом параметры двух основных гистерезисных моделей трения и отрыва, которые описывают распространение упругих волн в структурно неоднородных поликристаллических материалах, функционально связаны с прочностными характеристиками этих материалов.

Ключевые слова: поликристаллический материал, гистерезисная модель, междузеренная граница.

Influence of durability descriptions is structural heterogeneous polycrystalline materials on the parameters of resilient wave and on the coefficients of non-linearity of hysteresis models

S. Lisovets

Kiev National University of Technologies and Design

It is considered, how the parameters of two basic hysteresis models of friction and tearing away, which describe distribution of resilient waves in structurally heterogeneous *polycrystalline* materials, are functionally related to durability descriptions of these materials.

Keywords: polycrystalline material, hysteresis model, border between grains.