

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

С.М. Лісовець, к.т.н., доц.
А.С. Зенкін, д.т.н., проф.

ЗАСТОСУВАННЯ АКУСТИЧНОГО ЕФЕКТУ АМПЛІТУДНО-ЗАЛЕЖНОГО ВНУТРІШНЬОГО ТЕРТЯ ПРИ КОНТРОЛІ ДЕТАЛЕЙ З ПОЛІКРИСТАЛІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

Київський національний університет технологій та дизайну, м. Київ, ser_lis@voliacable.com

Наведено результати контролю межі міцності деталей з полікристалічних матеріалів, який оснований на ефекті амплітудно-залежного внутрішнього тертя. Показано, що зміна міцнісних характеристик полікристалічних матеріалів може змінювати фазову швидкість та коефіцієнт поглинання пружної хвилі, за умови її досить великої інтенсивності. На прикладі латуней також показано, що для врахування при контролі як параметрів пружної хвилі, так і параметрів навколишнього середовища необхідно застосовувати плани другого порядку.

Ключові слова: амплітудно-залежне внутрішнє тертя, дефектна структура, межа міцності при розриві (часовий опір), міцнісні характеристики, нелінійний акустичний ефект, план другого порядку.

Вступ.

Промислові підприємства України випускають велику кількість різноманітних виробів, починаючи від продукції машинобудування і закінчуючи будівельними конструкціями, до складу яких входять деталі, що знаходяться під дією механічних навантажень. Від ресурсу цих деталей залежить як час їх експлуатації, так і безпека людей та навколишнього середовища. В переважній більшості випадків ресурс таких деталей залежить від їх міцнісних характеристик, серед яких найважливішою характеристикою є межа міцності при розриві (часовий опір) σ_B .

Найбільшу точність визначення σ_B можна досягти, використовуючи руйнівні методи контролю. Але такі методи, зрозуміло, приводять до руйнування самих деталей і з цієї причини дуже часто не можуть застосовуватися. Наприклад, міцнісні характеристики можна визначити по значенню твердості матеріалу, яку вимірюють, вдавлюючи індентор-конус з кутом при вершині 90° в поліровану поверхню зразка [1, стор. 19]. Але при цьому сама поверхня зразка псується. Тому перевага, безперечно, віддається неруйнівним методам контролю, які мають як багато переваг, так і багато недоліків. Наприклад, міцнісні характеристики можна визначити по значеннях остаточної індукції та коерцитивної сили в постійних магнітних полях або по значеннях вихрових струмів в змінних магнітних полях [1, стор. 20].

Окремо необхідно виділити неруйнівні акустичні методи контролю. Наприклад, міцнісні характеристики можна визначити по значенням резонансних частот коливань [1, стор. 36], по значенням спектральних складових сигналів акустичної емісії [1, стор. 41] або по значенням швидкості розповсюдження та коефіцієнта загасання акустичної хвилі [1, стор. 57]. Але часто вірогідність такого акустичного контролю є низкою, що пов'язано із рядом чинників: дуже низьким рівнем сигналів та високим рівнем шумів, втратах в контактних шарах між акустичними перетворювачами та зразками, великим розкидом параметрів акустичних перетворювачів тощо

Постановка завдання.

Аналіз існуючих як руйнівних, так і неруйнівних методів контролю показав, що є необхідність в удосконаленні існуючих неруйнівних методів акустичного контролю та в розробці нових засобів контролю, які базуються на цих методах. Завдання полягає в тому, щоб підвищити вірогідність контролю як шляхом переходу на застосування нелінійних акустичних ефектів, так і шляхом врахування додаткових параметрів пружної хвилі та умов контролю. Зокрема, при здійсненні контролю

пропонується враховувати ефекти амплітудно-залежного внутрішнього тертя в матеріалі, що контролюється, а також обробляти дані шляхом застосування планів другого порядку.

Розв'язок поставленого завдання.

Відомо, що міцність деталей з полікристалічних матеріалів визначається найбільш слабкою складовою таких матеріалів, а саме границями їх зерен [1, 2]. Будова границь зерен дуже складна, тому вони є важливою складовою дефектної структури полікристалічних матеріалів [2]. Властивості границь між зернами мають суттєвий вплив на формування структури матеріалів, визначаючи процеси рекристалізації, сегрегації домішок, коалесценції дисперсних часток тощо. Достовірно відомо, що існують взаємні зв'язки між міцнісними характеристиками полікристалічних матеріалів та параметрами пружних хвиль, які проходять крізь ці матеріали [3, 4]. При цьому одними з нелінійних акустичних ефектів є зміна фазової швидкості $\Delta c/c$ та коефіцієнта поглинання $\Delta K/K$ пружної хвилі на основній частоті цієї хвилі. Ці ефекти пов'язані з явищем амплітудно-залежного внутрішнього тертя, яке полягає в порушенні в полікристалічному матеріалі лінійної залежності між механічними напруженнями σ та відносними деформаціями ε внаслідок створення в найбільш "м'яких" складових таких матеріалів (до яких можна віднести і границі між зернами) екстремально високих відносних деформацій ε . Такі зміни $\Delta c/c$ та $\Delta K/K$ виникають при перевищенні інтенсивністю пружної хвилі певної межі і не перевищують зазвичай $(0,5...1,0)\%$.

Внаслідок малості $\Delta c/c$ та $\Delta K/K$ звичайними засобами виміряти їх практично неможливо, тому пропонується зондувати полікристалічні матеріали пакетами пружних коливань (кількість коливань в кожному з пакетів становить від 20 до 100) із жорстко заданим співвідношенням амплітуд (відношення амплітуди більшого пакету до амплітуди меншого пакету становить від 10:1 до 100:1), як показано на рис. 1 – причому при прийманні пакетів пружних коливань виконується зменшення амплітуди більшого пакету в ту ж саму кількість раз, а амплітуда меншого пакету остається незмінною. Оптимальні значення кількості коливань в кожному з пакетів та відношення амплітуди більшого пакету до амплітуди меншого пакету визначаються необхідним спектром пружної хвилі, рівнем акустичної нелінійності зразків та геометричними розмірами зразків – причому не тільки розрахунковим шляхом, але й підбором під час проведенням досліджень.

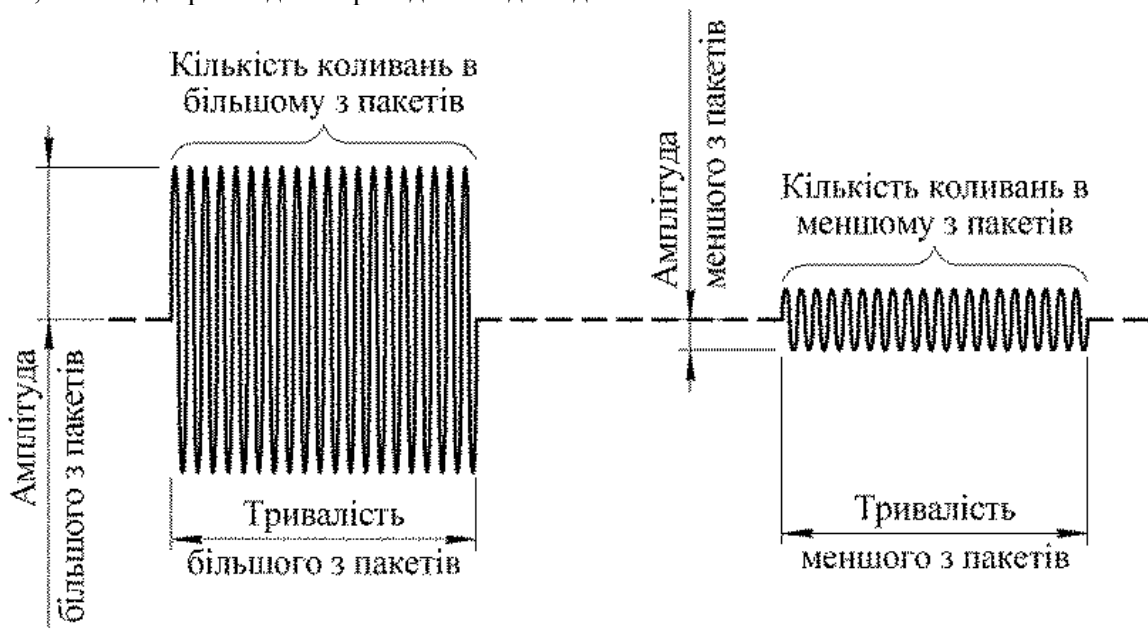


Рис. 1. Розподіл пакетів коливань в пружній хвилі

Відповідно, проходження пакета з меншою амплітудою (який відповідає максимальній відносній деформації середовища $\varepsilon_m = 10^{-8} \dots 10^{-6}$) буде здійснюватися за відсутності ефекту зміни $\Delta c/c$ та $\Delta K/K$, а проходження пакета з більшою амплітудою (який відповідає максимальній відносній дефо-

рмації середовища $\varepsilon_m = 10^{-6} \dots 10^{-5}$), навпаки, приведе до зміни $\Delta c/c$ та $\Delta K/K$. Для вимірювання $\Delta c/c$ пропонуються засоби [5, 6], а для вимірювання $\Delta K/K$ – засоби [7]. Відомо, що такі параметри пружної хвилі, як фазова швидкість c та коефіцієнт поглинання K , залежать не тільки від акустичної нелінійності зразків (максимальної відносної деформації середовища ε_m та межі міцності при розриві (часового опору) σ_B), але й від багатьох інших факторів – зокрема, від температури T зразка.

Результати досліджень показують, що інші фактори, такі як кількість коливань в кожному з пакетів або відношення амплітуди більшого пакету до амплітуди меншого пакету, є незначущими і їх впливом можна нехтувати. Також результати досліджень показують, що взаємний зв'язок між всіма факторами є досить складним, і є необхідність в застосуванні планування експерименту із планами другого порядку. Зокрема, проводилися теоретичні та експериментальні дослідження, метою яких була побудова функціональних залежностей виду $\Delta c/c = F(\sigma_B, \varepsilon_m, T)$ та $\Delta K/K = F(\sigma_B, \varepsilon_m, T)$ для багатокомпонентних деформовуваних латуней різновидів ЛО60-1, ЛО62-1, ЛО70-1, ЛО90-1. При цьому необхідно зауважити, що нелінійні акустичні властивості матеріалів в вигляді зміни $\Delta c/c$ та $\Delta K/K$ при відносно невеликій максимальній відносній деформації середовища $\varepsilon_m \leq 10^{-6} \dots 10^{-5}$ проявляються не у всіх полікристалічних матеріалів – однак напевно відомо, що вони проявляються в таких “м'яких” полікристалічних матеріалах, як мідь, цинк, свинець [3, 4]. Для обробки результатів експериментальних досліджень застосовувалося планування експерименту із планами другого порядку, при цьому в якості цільових функцій застосовувалися відповідно функції

$$\Delta c/c(x_1, x_2, x_3) = \alpha_0 + \sum_{1 \leq i \leq k} \alpha_i x_i + \sum_{1 \leq i < j \leq k} \alpha_{ij} x_i x_j + \sum_{1 \leq i \leq k} \alpha_{ii} x_i^2 \quad (1)$$

та

$$\Delta K/K(x_1, x_2, x_3) = \beta_0 + \sum_{1 \leq i \leq k} \beta_i x_i + \sum_{1 \leq i < j \leq k} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{1 \leq i \leq k} \beta_{ii} x_i^2, \quad (2)$$

де k – кількість вхідних факторів; $\alpha_0, \alpha_i, \alpha_{ij}, \alpha_{ii}, \beta_0, \beta_i, \beta_{ij}, \beta_{ii}$ – коефіцієнти плану другого порядку; x_i, x_j – кодовані вхідні фактори.

Так як було обрано значущими лише три вхідних фактори σ_B, ε_m та T , то відповідно приймалося, що $k = 3$. Відповідно до цього вхідному фактору σ_B відповідав кодований вхідний фактор x_1 , фактору ε_m – кодований фактор x_2 , а фактору T – кодований фактор x_3 .

Розглянемо побудову плану другого порядку для олов'янистої латуні ЛО62-1, цільова функція якого має вигляд (1) (план другого порядку, цільова функція якого має вигляд (2), будується аналогічно). Для латуні ЛО62-1 було обрано наступні основні рівні факторів (центр плану) та інтервали варіювання в натуральному масштабі: для фактору $X_1 - \sigma_B = 550 \text{ МПа}$ та $\Delta \sigma_B = 100 \text{ МПа}$, для фактору $X_2 - \varepsilon_m = 0,50 \cdot 10^{-5}$ та $\varepsilon_m = 0,25 \cdot 10^{-5}$, для фактору $X_3 - T = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ та $\Delta T = 40 \text{ }^\circ\text{C}$. Основна частота пружної хвилі становила $1,5 \text{ МГц}$, що при середній швидкості пружної хвилі в латуні близько 4500 м/с відповідає довжині поздовжньої хвилі приблизно 3 мм . Наприклад, діапазон зміни фактору X_1 в натуральному масштабі визначався тим, що для відпаленої олов'янистої латуні ЛО62-1 межа міцності при розриві (часовий опір) σ_B становить приблизно 400 МПа , а для деформованої олов'янистої латуні ЛО62-1 – приблизно 700 МПа . Тобто для латуней однакового хімічного складу, але які мають різну структуру кристалічної решітки (з точки зору нелінійної акустики вони представляють собою структурно-нелінійні середовища із різними параметрами нелінійності), межі міцності при розриві (часові опори) σ_B можуть відрізнятись майже в два рази.

Експериментальне дослідження межі міцності при розриві (часового опору) σ_B для ЛО62-1 виконувалося на розривній випробувальній машині УМ-5 з механічним навантаженням зразка і з важільно-маятниковим силовимірювачем. Зразки представляли собою прутки круглої та шестигранної форми довжиною до 1 м – таким чином, їх дуже зручно було розрізати на частини довжиною $(0,15 \dots 0,20) \text{ м}$ і підготовлювати для закріплення в нижньому та верхньому захваті машини УМ-5. Після підготовки зразки розривалися на машині УМ-5, причому їх температура контролювалася за допомогою термо-

метра опору ТСП 0313 (основне призначення термометрів опору ТСП 0313 – вимірювання температури циліндричних поверхонь). Безпосередньо перед розривом для зразків вимірювалися зміни фазової швидкості $\Delta c/c$ при заданих значеннях максимальної відносної деформації середовища ε_m , причому їх температура також контролювалася за допомогою термометра опору ТСП 0313. Необхідно відмітити, що при середній довжині зразків $(0,15 \dots 0,20) \text{ м}$ і довжині поздовжньої хвилі приблизно 3 мм по всій довжині зразка укладалося приблизно $50 \dots 65$ довжин пружної хвилі, що принципово є достатнім для виникнення та реєстрації нелінійних акустичних ефектів.

Таким чином, можна було отримати одну з комбінацій параметрів $(\Delta c/c, \sigma_B, \varepsilon_m, T)$, які відповідають тому або іншому дослід (точці) факторного плану. Кожний дослід факторного плану виконувався без дублювання, що було пов'язано з відносно високою вартістю зразків. Обробка результатів дослідів методами планування експерименту дозволяє отримати “паспорт” виробу з ЛОБ2-1 (а загалом із будь-якого полікристалічного матеріалу). Тобто з цільової функції (1), виконавши нескладні перетворення, можна отримати відповідно залежність $\sigma_B = F(\Delta c/c, \varepsilon_m, T)$. Іншими словами, маючи якийсь конкретний виріб з полікристалічного матеріалу при певній температурі (яка визначається умовами його експлуатації) та помірявши $\Delta c/c$, можна або спрогнозувати σ_B (тобто виконати її непряме вимірювання), або визначити належність σ_B до певного діапазону значень (тобто виконати її контроль).

Для обробки результатів експериментального дослідження межі міцності при розриві (часового опору) σ_B для ЛОБ2-1 застосовувався симетричний композиційний ортогональний план другого порядку [8]. Як відомо, найчастіше під симетричністю розуміють розташування всіх дослідів симетрично відносно основного рівня (центра) плану, під композиційністю – можливість послідовної добудови лінійних планів до планів другого порядку, а під ортогональністю – спрощення розрахункових формул та можливість оцінки коефіцієнтів цільових функцій (1) та (2) незалежно один від одного. Відомо, що для досягнення ортогональності плану його інформаційна матриця повинна бути діагональною [8]. Так як для планів виду (1) та (2) інформаційна матриця в загальному випадку недиагональна, то досягти ортогональності можна, ввівши додаткову змінну λ :

$$\lambda = \frac{\sum_{u=1}^N x_{i_u}^2}{N}, \quad (3)$$

де N – загальна кількість дослідів для планів (1) та (2), i – порядковий номер кодованого вхідного фактора, $i=1 \dots 3$ (результат обчислення буде однаковий незалежно від того, чи $i=1$, $i=2$ або ж $i=3$).

А також ще три додаткові змінні x'_1 , x'_2 , x'_3 та новий вільний член α'_0 :

$$x'_1 = x_1^2 - \lambda, \quad x'_2 = x_2^2 - \lambda, \quad x'_3 = x_3^2 - \lambda, \quad \alpha'_0 = \alpha_0 + \lambda \sum_{i=1}^k \alpha_{ii}. \quad (4)$$

Таким чином, цільова функція (1) перетворюється відповідно на цільову функцію

$$\Delta c/c(x_1, x_2, x_3) = \left(\alpha_0 + \lambda \sum_{i=1}^k \alpha_{ii} \right) + \sum_{1 \leq i \leq k} \alpha_i x_i + \sum_{1 \leq i \leq j \leq k} \alpha_{ij} x_i x_j + \sum_{1 \leq i \leq k} \alpha_{ii} (x_i^2 - \lambda). \quad (5)$$

Також відомо, що для досягнення ортогональності плану додаткові досліді необхідно проводити на відстані a від центру цього плану, причому a залежить як від кількості вхідних факторів k , так і від кількості дослідів $n_{ЦП}$ в центрі плану (так як в центрі плану було вирішено провести один дослід, то відповідно $n_{ЦП} = 1$):

$$\alpha = \sqrt{\frac{\sqrt{(2^k + 2k + n_{\text{ЦП}})2^k - 2^k}}{2}} = \sqrt{\frac{\sqrt{(2^3 + 2 \cdot 3 + 1) \cdot 2^3 - 2^3}}{2}} = \pm 1,215. \quad (6)$$

Відповідно до цього, спочатку був реалізований повний факторний експеримент, який складався з восьми дослідів (див. табл. 1).

Таблиця 1

Симетричний композиційний ортогональний план другого порядку. Повний факторний експеримент

№ дослід- ду	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x'_1 = x_1^2 - \lambda$	$x'_2 = x_2^2 - \lambda$	$x'_3 = x_3^2 - \lambda$	y
1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+0,270	+0,270	+0,270	0,00110
2	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+0,270	+0,270	+0,270	0,00350
3	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+0,270	+0,270	+0,270	0,00040
4	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+0,270	+0,270	+0,270	0,00120
5	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+0,270	+0,270	+0,270	0,00090
6	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+0,270	+0,270	+0,270	0,00290
7	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+0,270	+0,270	+0,270	0,00026
8	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+0,270	+0,270	+0,270	0,00045

Побудова на основі цих дослідів лінійної моделі показала, що вона є неадекватною. Після цього для здійснення композиційного переходу до плану другого порядку повний факторний експеримент було доповнено дослідом в шести зіркових точках (див. табл. 2).

Таблиця 2

Симетричний композиційний ортогональний план другого порядку. Зіркові точки

№ дослід- ду	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x'_1 = x_1^2 - \lambda$	$x'_2 = x_2^2 - \lambda$	$x'_3 = x_3^2 - \lambda$	y
9	+1	+1,215	0	0	0	0	0	+0,745	-0,730	-0,730	0,00050
10	+1	-1,215	0	0	0	0	0	+0,745	-0,730	-0,730	0,00230
11	+1	0	+1,215	0	0	0	0	-0,730	+0,745	-0,730	0,00240
12	+1	0	-1,215	0	0	0	0	-0,730	+0,745	-0,730	0,00030
13	+1	0	0	+1,215	0	0	0	-0,730	-0,730	+0,745	0,00150
14	+1	0	0	-1,215	0	0	0	-0,730	-0,730	+0,745	0,00100

Крім того, ще один додатковий дослід було виконано в центрі плану (див. табл. 3).

Таблиця 3

Симетричний композиційний ортогональний план другого порядку. Центр плану

№ дослід- ду	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x'_1 = x_1^2 - \lambda$	$x'_2 = x_2^2 - \lambda$	$x'_3 = x_3^2 - \lambda$	y
15	+1	0	0	0	0	0	0	-0,730	-0,730	-0,730	0,00130

У зв'язку із ортогональністю плану другого порядку (5) оцінка його коефіцієнтів здійснювалася незалежно один від одного за формулами:

$$\alpha'_0 = \frac{\sum_{u=1}^N y_u}{N}, \quad \alpha_i = \frac{\sum_{u=1}^N x_{i_u} y_u}{\sum_{u=1}^N x_{i_u}^2}, \quad \alpha_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^N x_{i_u} x_{j_u} y_u}{\sum_{u=1}^N x_{i_u}^2 x_{j_u}^2}, \quad \alpha_{ii} = \frac{\sum_{u=1}^N x'_{i_u} y_u}{\sum_{u=1}^N x_{i_u}^{\prime 2}}, \quad (7)$$

звідки $\alpha'_0 = 0,001334$, $\alpha_1 = -0,000692$, $\alpha_2 = 0,000789$, $\alpha_3 = 0,000210$, $\alpha_{12} = -0,000426$, $\alpha_{13} = -0,000126$, $\alpha_{23} = -0,000011$, $\alpha_{11} = 0,000053$, $\alpha_{22} = 0,000020$, $\alpha_{33} = -0,000048$.

При побудові плану другого порядку необхідно було мати оцінку дисперсії досліду S_y^2 . Так як кожний дослід плану виконувався без дублювання, а єдина можливість її отримати при плануванні експерименту – дублювати (повторювати) дослід, то дисперсія досліду S_y^2 визначалася по результатам проведених до цього аналогічних робіт. Відповідно було прийнято, що $S_y^2 = 0,00002$. Дисперсії оцінок коефіцієнтів також розраховують за простими формулами:

$$S_{\alpha'_0}^2 = \frac{S_y^2}{N}, \quad S_{\alpha_i}^2 = \frac{S_y^2}{\sum_{u=1}^N x_{i_u}^2}, \quad S_{\alpha_{ij}}^2 = \frac{S_y^2}{\sum_{u=1}^N x_{i_u}^2 x_{j_u}^2}, \quad S_{\alpha_{ii}}^2 = \frac{S_y^2}{\sum_{u=1}^N x_{i_u}^{\prime 2}}, \quad (8)$$

звідки $S_{\alpha'_0}^2 = 1,3 \cdot 10^{-6}$, $S_{\alpha_1}^2 = S_{\alpha_2}^2 = S_{\alpha_3}^2 = 1,8 \cdot 10^{-6}$, $S_{\alpha_{12}}^2 = S_{\alpha_{13}}^2 = S_{\alpha_{23}}^2 = 2,5 \cdot 10^{-6}$, $S_{\alpha_{11}}^2 = S_{\alpha_{22}}^2 = S_{\alpha_{33}}^2 = 4,6 \cdot 10^{-6}$.

Від плану (5) до плану (1) можна перейти, розрахувавши значення коефіцієнта α_0 :

$$\alpha_0 = \alpha'_0 - \lambda \sum_{i=1}^k \alpha_{ii}, \quad (9)$$

звідки $\alpha_0 = 0,001316$. Оскільки коефіцієнт α'_0 (з одного боку) та коефіцієнти α_1 , α_2 , α_3 (з іншого боку) оцінені незалежно один від одного, до дисперсія $S_{\alpha_0}^2$ визначається згідно із законом накопичування похибок:

$$S_{\alpha_0}^2 = S_{\alpha'_0}^2 + \lambda^2 \sum_{i=1}^k S_{\alpha_{ii}}^2, \quad (10)$$

звідки $S_{\alpha_0}^2 = 8,7 \cdot 10^{-6}$. Порівняння абсолютних значень розрахованих коефіцієнтів з їх довірчими інтервалами при рівні значимості 0,05 показало, що статично значимими можна признати всі коефіцієнти рівняння (5). Таким чином, рівняння (5) приймає вигляд

$$\Delta c/c(x_1, x_2, x_3) = 0,001316 - 0,000692x_1 + 0,000789x_2 + 0,000210x_3 - 0,000426x_1x_2 - 0,000126x_1x_3 - 0,000011x_2x_3 + 0,000053x_1^2 + 0,000020x_2^2 - 0,000048x_3^2, \quad (11)$$

де, у відповідності із умовами проведення даного факторного експерименту, кодовані (x_i) і натуральні (X_i) фактори зв'язані співвідношеннями:

$$x_1 = \frac{X_1 - 550\text{Па}}{100\text{Па}}, \quad x_2 = \frac{X_2 - 0,50 \cdot 10^{-5}}{0,25 \cdot 10^{-5}}, \quad x_3 = \frac{X_3 - 60^\circ\text{C}}{40^\circ\text{C}}. \quad (12)$$

Представлення результатів експериментів поліномом другого ступеня виявилось виправданим, так як

всі нелінійні члени суттєво відрізняються від нуля. Перевірка адекватності моделі (11) згідно із F -критерієм при рівні значимості 0,05 показало адекватність цієї моделі.

Подальші розрахунки полягають у тому, щоб із рівняння (11), яке по суті представляє собою залежність $\Delta c/c = F(x_1, x_2, x_3)$, шляхом підстановки в нього натуральних факторів (X_i) замість кодованих факторів (x_i) отримати залежність $\Delta c/c = F(\sigma_B, \varepsilon_m, T)$. А після цього, розв'язавши залежність $\Delta c/c = F(\sigma_B, \varepsilon_m, T)$ відносно σ_B , отримати в явному вигляді залежність $\sigma_B = F(\Delta c/c, \varepsilon_m, T)$, яка по суті є "паспортом" виробу з ЛЮ62-1.

Висновки

Результати досліджень показують, що застосування при контролі міцнісних характеристик полікристалічних матеріалів акустичного ефекту амплітудно-залежного внутрішнього тертя, а також врахування як параметрів пружної хвилі, так і параметрів навколишнього середовища дозволяють суттєво підвищити вірогідність контролю та зменшити його похибки.

Список літературних джерел

1. Ботаки А.А., Ульянов В.Л., Шарко А.В. Ультразвуковой контроль прочностных свойств конструкционных материалов / А.А. Ботаки, В.Л. Ульянов, А.В. Шарко. – М.: Машиностроение, 1981. – 80 с.
2. Чувильдеев В.Н. Неравновесные границы зерен в металлах. Теория и приложения / В.Н. Чувильдеев. – М.: Физматлит, 2004. – 304 с.
3. Назаров В.Е. Численное моделирование динамических гистерезисов для микронеоднородных сред с несовершенной упругостью и релаксацией / В.Е. Назаров, А.В. Радостин // Акустический журнал. – 2006. – Т. 52. – № 4. – С. 514–520.
4. Назаров В.Е. Влияние акустической нелинейности на характер нелинейных волновых процессов в твердых телах. Обратная задача / В.Е. Назаров // Акустический журнал. – 2007. – Т. 53. – № 5. – С. 666–671.
5. Патент № 13404 А. Україна. МПК G01N 5/00, G01N 29/00, G01N 29/07, G01N 29/48. Спосіб визначення швидкості поширення акустичних 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.
6. Патент № 50186. Україна. МПК G01N 7/00. Спосіб вимірювання часу проходження акустичних імпульсів. – Київський національний університет технологій та дизайну; Скрипник Ю.О., Лісовець С.М. – № u200913061; Заявл. 15.12.2009; Опубл. 25.05.2010, Бюл. № 10.
7. 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.
8. Новик Ф.С., Арсов Я.Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов / Ф.С. Новик, Я.Б. Арсов. – М.: Машиностроение; София: Техника, 1980. – 304 с.