

УДК 620.179

А.Г. Протасов, канд. техн. наук, доц.
Г.С. Юрченко, студ.

ДОСЛІДЖЕННЯ ІМПЕДАНСНОГО МЕТОДУ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ СОТОВИХ КОНСТРУКЦІЙ

НАУ, кафедра інформаційно-вимірвальних систем
E-mail: protasov@i.com.ua

Проведено аналітичне дослідження механічного імпедансу сотових конструкцій. Розроблено математичну модель, яка дозволяє аналізувати вплив параметрів дефектів, об'єкта контролю, умов збудження на результати контролю імпедансним методом. Проаналізовано амплітудний та фазовий режими методу.

This paper presents the analytical investigation of honeycomb structure mechanical impedance. The mathematical model for analysing influence feature of defects, object parameters and condition of excitation on results of control was developed. Also was analysed the amplitude and phase mode of impedance method.

Вступ

Сьогодні важко уявити собі сучасне авіабудування та ракетобудування без широкого використання таких матеріалів, як сотові структури.

В окремих літаках близько 30% площини фюзеляжу та крила виготовляють саме із таких матеріалів, вони мають велику міцність та малу питому вагу.

В авіабудуванні найбільш розповсюджені алюмінієві сотові панелі, у космічній техніці застосовують сотові панелі з обшивкою із вуглепластика чи склопластика. У процесі експлуатації авіаційних апаратів або через технологічні причини в сотових структурах можуть утворюватись дефекти.

Одними з найбільш поширених дефектів сотової структури є відшарування сот від обшивки внаслідок непроклеювання та зминання стінок.

Наявність таких дефектів негативно впливає на міцнісні характеристики конструкції апарата. Тому задача ефективного пошуку утворених дефектів у сотових панелях є актуальною.

Аналіз досліджень і публікацій

Для контролю багатошарових конструкцій широко застосовують акустичні методи неруйнівного контролю [1]. У таблиці наведено порівняльний аналіз ефективності акустичних методів контролю. Серед акустичних методів найбільш чутливим до дефектів малого розміру є імпедансний метод, заснований на принципі використання пружних коливань низьких частот.

Основна область застосування методу – виявлення дефектів клесних та паяних з'єднань між порівняно тонкою (до 3 мм для алюмінієвих сплавів та 1,7 мм для сталей) обшивкою та елементом жорсткості (лонжероном, нервюрою) або заповнювачем (пінопластом, сотами), а також дефектів типу розшарувань та непроклеювань у металічних покриттях та виробих з шаруватих пластиків, що залягають на глибині 15–20 мм [2].

Широкому застосуванню імпедансного методу сприяли його універсальність, зручність в експлуатації, відсутність необхідності змочування об'єкта контролю, легкість контролю криволінійних поверхонь, простота та доступність апаратури.

У загальному вигляді імпеданс сотової конструкції має вигляд [3]:

$$Z = \frac{\dot{F}}{\dot{v}} = R_H + jX_H = |Z|e^{j\varphi}, \quad (1)$$

Основні характеристики акустичних методів неруйнівного контролю багатошарових конструкцій

Метод	S_{\min} , см ²	H_{\max} , мм	H_{\min} , мм
Тіньовий	0,1	–	0
Ехо	0,5	200	3–5
Акустико-топографічний	0,05	3–5	0
Резонансний локальний	1	–	–
Велосиметричний	2–15	20–25	0,3–0,5
Вільних коливань	1–15	30	0,5
Імпедансний: контроль зі сполученим перетворювачем	0,07	2,5 для алюмінію 1,5 для сталі 6 для пластику	0,1
контроль з роздільно-сполученим перетворювачем	0,8	3 для алюмінію 15–20 для пластику	0,1–0,3

Примітка. S_{\min} – мінімальна площа дефекту, що виявляється; H_{\max} , H_{\min} – максимальна та мінімальна глибина розташування дефекту.

де Z – механічний імпеданс конструкції; F – комплексна амплітуда сили, яка прикладена до поверхні; \dot{v} – коливальна швидкість у точці прикладання сили; R_H , X_H – активна та реактивна складові імпедансу, $\varphi = \arctg(X_H / R_H)$.

Механічний імпеданс багатошарової конструкції в зоні прикладання збуджуючої сили визначається всіма елементами цієї конструкції, що з'єднані в одну механічну систему.

Коли всі шари конструкції пов'язані між собою, вона коливається як єдине ціле і модуль $|Z|$ має максимальне значення.

Якщо у виробі відбувається дефект у вигляді порушення з'єднання між шарами, то жорсткість відділеної ділянки буде менше жорсткості, ніж у зонах доброякісного з'єднання шарів. Тому модуль $|Z|$ дефектної зони буде менше, ніж бездефектної, що супроводжується також поворотом $|Z|$ на деякий кут.

Зі зміною $|Z|$ змінюється коефіцієнт передачі акустичного перетворювача [3]:

$$\dot{P} = \frac{\dot{U}_n}{\dot{U}_b} = P e^{j\psi},$$

де U_n , U_b – амплітуди сигналів, що приймаються та випромінюються перетворювачем відповідно; ψ – зсув фаз між амплітудами U_n та U_b .

Отже, дефект з'єднання може бути виявлений за зміною механічного імпедансу виробу $|Z|$ і відмічається за зміною амплітуди P чи фази φ , або за одночасною їх зміною.

Для математичного опису механічного імпедансу сотової конструкції в літературі використовують деякі спрощення.

Так, ділянка обшивки структури з дефектом розглядається як пластина, що закріплена по контуру дефекта. Тоді розміри дефекта визначаються розмірами цієї пластини, і вхідний імпеданс

такої пластини має вигляд [3]:

$$Z_1 = j \left[\omega m - \frac{1}{\omega K_1} \right], \quad (2)$$

де ω – кутова частота; m – фізична маса пластини з діаметром D ; K_1 – гнучкість пластини у центрі. Вхідний імпеданс бездефектної ділянки сотової структури має вигляд [4]:

$$Z_2 = \frac{jX}{1 - X\omega \frac{l_k}{D_k}}, \quad (3)$$

де X – механічний імпеданс ребра сотової комірки:

$X = \rho_s l_s$; ρ_s, l_s – щільність та товщина листа сотової комірки відповідно; l_k – товщина шару клею; D_k – константа, що характеризує фізичні властивості клею.

Мета статті – дослідження впливу складових акустичного тракту на результати контролю сотових конструкцій імпедансним методом.

Постановка задачі – провести математичне моделювання імпедансного методу контролю сотових конструкцій та проаналізувати вплив параметрів об'єкта контролю на результати контролю.

Математичне моделювання

механічного імпедансу дефектної структури

Розглянемо механічний імпеданс багатошарової конструкції в зоні дефекту. Припустимо, що модель дефекту має форму кола діаметром D .

Реактивну складову X механічного імпедансу пластини можна виразити через еквівалентні зосереджені сталі – масу m_e та гнучкість K_e пластини, що збуджується в центрі зосередженою силою [5]:

$$m_e = \frac{7}{256} \rho \pi h D;$$

$$K_e = 3 \frac{(1 - \mu^2) D^2}{16 \pi E h^3},$$

де ρ , h , E – щільність, товщина, модуль Юнга матеріалу обшивки відповідно.

Тоді

$$Z_1 = X = j \left[\omega m_e - \frac{1}{\omega K_e} \right]. \quad (4)$$

Дефект будемо розглядати як заповнений газом прошарок, товщина якого набагато менше довжини хвилі в газі. Тоді зосереджена гнучкість такого прошарку буде:

$$K_r = \frac{64 h_r}{\rho_r c_r^2 (\pi D)^2},$$

де h_r – середня товщина зазору; ρ_r – щільність газу; c_r – швидкість звуку в газі.

Результуюча гнучкість буде визначатися за виразом:

$$K'_e = \frac{K_e K_r}{K_e + K_r}.$$

Для визначення впливу розкриття зазору (дефекту) на механічний імпеданс розрахуємо співвідношення між зосередженою гнучкістю пластини без урахування дефекту K_e та з результуючою гнучкістю K'_e .

$$\frac{K_e}{K'_e} = \frac{3(1 + \mu^2) c_r \rho_r^2 D^4}{1024 \cdot E h_r h^3} + 1.$$

На рис. 1 показано залежність K_e/K'_e від розкриття зазору для декількох значень діаметра пластины з алюмінію.

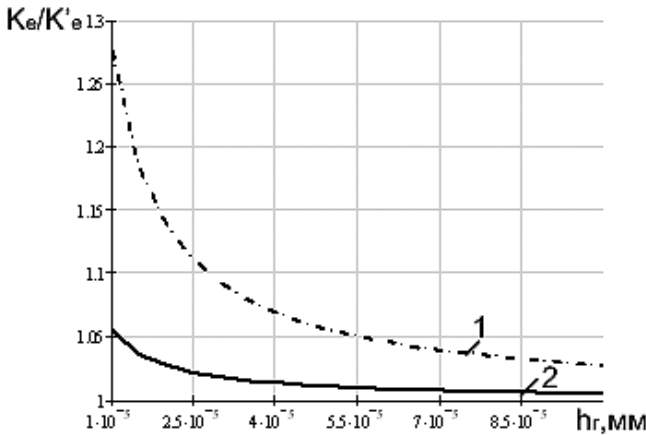


Рис. 1. Залежність K_e/K'_e від розкриття зазору h_r приєднаного повітряного прошарку:
1 – $D = 32$ мм; 2 – $D = 24$ мм

Найбільший вплив на імпеданс відокремленої дефектом ділянки спостерігається у випадку більш крупних дефектів. Саме тоді дефекти викликають найбільш різку зміну рівня сигналу і виявляються достатньо чітко.

За формулою (4) розрахуємо реактивну складову імпедансу сотової конструкції:

$$X = \omega \left(\frac{7}{256} \rho \pi h D^2 \right) - \frac{1}{\omega 0,0597 \frac{(1-\mu^2) D^2}{E h^3}} \quad (5)$$

Із рис. 2 видно, що зі збільшенням частоти збільшується модуль реактивної складової імпедансу.

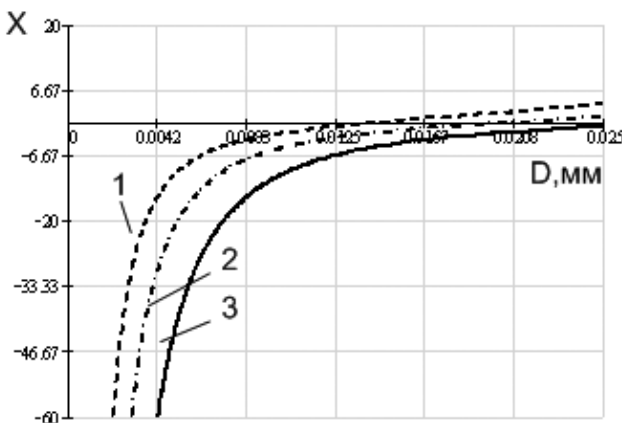


Рис. 2. Результати розрахунку механічного імпедансу об'єкта:
1 – подвоєна частота 2ω ; 2 – робоча частота ω ;
3 – половина робочої частоти $\omega/2$

Але також спостерігається деяка неточність обраної моделі (заміна зони дефекту закріпленою по контуру пластиною), оскільки за відсутності дефекту ($D = 0$) значення імпедансу повинно бути скінченним.

На рис. 2 він прямує до нескінченності. Крім того, характерно, що майже всюди за винятком зон крупних дефектів імпеданс Z зберігає пружно-реактивний характер.

Математичне моделювання акустичного тракту

Розглянемо залежність коефіцієнта передачі акустичного перетворювача $P = U_{II} / U_B$ від механічного імпедансу об'єкта контролю Z . Цей коефіцієнт характеризує акустичний тракт.

Основним результатом розрахунку акустичного тракту є коефіцієнт ослаблення акустичного тракту, або коефіцієнт акустичного тракту, який залежить від співвідношення механічного імпедансу бездефектної та дефектної ділянок сотової конструкції:

$$K_{a.r} = \frac{Z_1}{Z_2}$$

Знайдемо співвідношення між формулами (2) і (3):

$$K_{a.r} = \frac{\frac{7}{256} \rho \pi h D^2 \omega - \frac{16 \pi E h^2}{3(1-\mu^2) D^2 \omega}}{\frac{\omega \rho_s l_s}{1 - \omega^2 \rho_s l_s \frac{l_k}{D_k}}}$$

Після деяких спрощень та змін отримаємо формулу для коефіцієнта акустичного тракту для імпедансного методу контролю :

$$K_{a.r} = \left(0,13m - \frac{64 \pi L}{D^2 \omega^2} \right) \left(\frac{1}{\rho_s l_s} - \omega^2 \frac{l_k}{D_k} \right),$$

де L – циліндрична жорсткість матеріалу обшивки.

Як бачимо на коефіцієнт акустичного тракту впливають фізичні та механічні параметри всіх складових об'єкта контролю – обшивки, клею, сотового заповнювача.

З рис. 3 видно, що чим більша щільність і товщина сотого заповнювача та менше циліндрична жорсткість обшивки, тим легше визначити дефект.

Амплітудний метод виявлення дефектів

При амплітудному методі імпеданс об'єкта Z , що контролюється, оцінюється за амплітудою вихідного сигналу перетворювача.

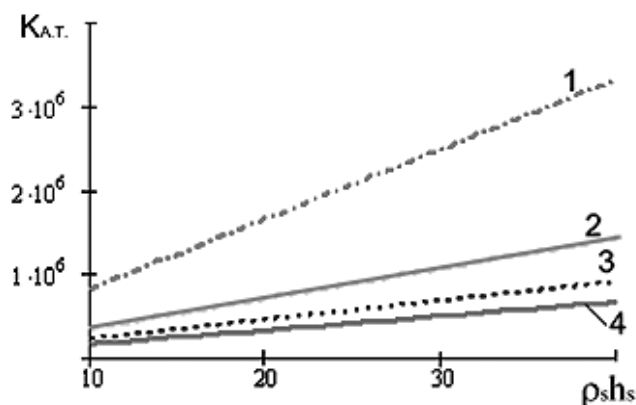


Рис. 3. Вплив щільності та товщини сотового заповнювача на коефіцієнт акустичного тракту для різних значень циліндричної жорсткості обшивки L :

1 – $L = 0,02$; 2 – $L = 0,04$; 3 – $L = 0,06$; 4 – $L = 0,08$

Для сотових панелей з періодичною структурою характерна періодична зміна сигналу на бездефектних ділянках.

Значення напруги мінімальні в зонах, що найбільш віддалені від місць з'єднання обшивки з заповнювачем і максимальні над цими з'єднаннями.

Так, у сотовій панелі мінімуми відповідають центрам сотових комірок, максимуми – вершинам. Ось чому при контролі виробів з періодичною структурою внутрішніх елементів показники дефектоскопа в доброякісній зоні мають великі розходження.

На рис. 4 показано розташування комірок сотового заповнювача під обшивкою і зміна показників дефектоскопа при переміщенні сумісного перетворювача за траєкторією, відміченою штрихпунктирною лінією.

Якщо сигналізатор дефектів спрацьовує на рівні нижче I, то реєструються тільки дефектні зони. На рівні II сотові комірки реєструються як дефекти. Розкид показань у доброякісних зонах тим більше, чим менше жорсткість обшивки та більше комірки заповнювача.

Амплітуду напруги, що свідчить про наявність дефекту та його відсутність для чотирьох випадків (перетворювач знаходиться в бездефектній зоні в положенні перетворювача над центром комірки, наявність мінімального та максимального дефекту, розрахуємо за формулою.

$$U = U_{36} T K_{e.a.t.}$$

де U_{36} – напруга, що подається на випромінюючий елемент; T – коефіцієнт проходження акустичного сигналу через прошарки сотової конструкції; $K_{e.a.t.}$ – коефіцієнт електроакустичного тракту.

У випадку доброякісного з'єднання (розміщення перетворювача над центром комірки, що також є бездефектною зоною) амплітуда вихідного сигналу дефектоскопа знаходиться в межах від 6,4 мВ до 5,08 В.

На рис. 4 це відповідає діапазону напруг [U2min; U2max].

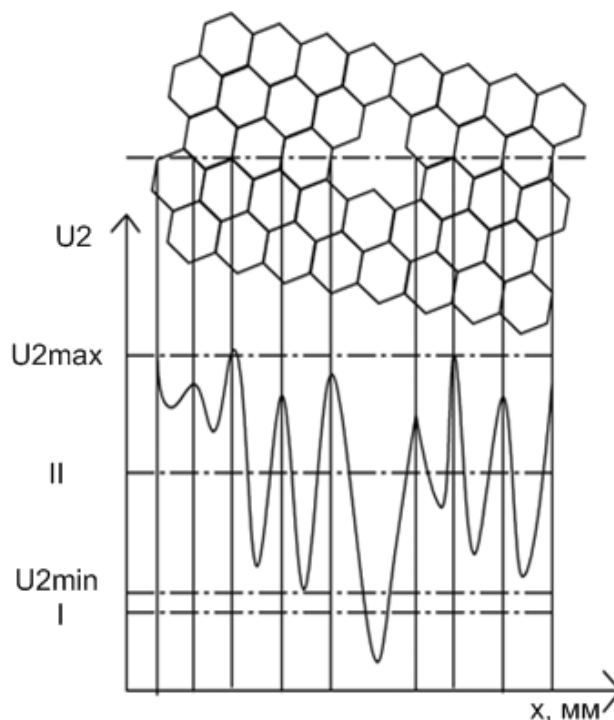


Рис. 4. Вимірювання амплітуди сигналу на виході сумісного перетворювача при контролі імпедансним методом сотової панелі

У випадку недоброякісного з'єднання (мінімальний дефект 0,016 м) амплітуда вихідного сигналу буде менше 3,3 мВ.

На рис. 4 це відповідає позначці I.

Фазовий метод виявлення дефектів

Про наявність дефектів можна судити не тільки за зміною амплітуди, а і за фазовим зсувом сигналу (1).

Активну складову імпедансу можна записати як [5]

$$Z = 2,31h^2 \sqrt{\frac{E\rho}{1-\mu^2}}, \quad (6)$$

а реактивна складову розраховується за формулою (5).

Заданося межами розміру дефекту від 0,016 до 0,1 м та, використовуючи формули (1), (5), (6), побудуємо графік комплексної величини імпедансу (рис. 5).

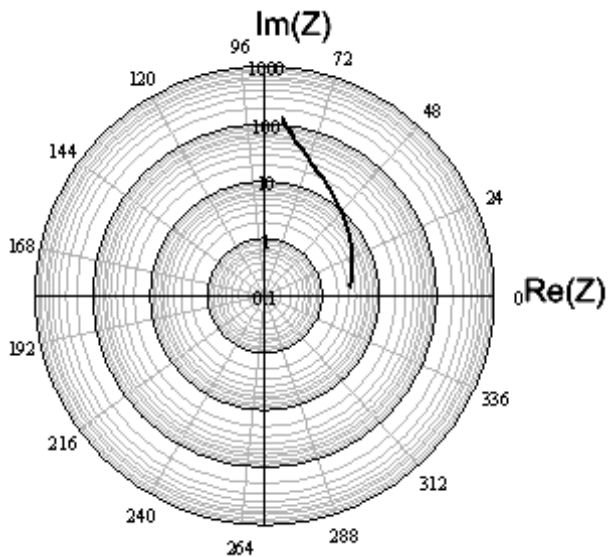


Рис. 5. Годограф комплексної величини імпедансу

У діапазоні дефектів, що нас цікавлять, фазова складова змінюється на незначну величину. Це пояснюється невисоким модулем механічного імпедансу розглядуваної сотової конструкції. Тому при контролі сотових панелей амплітудний режим обробки сигналів є більш інформативним.

Висновки

Розроблена математична модель механічного імпедансу сотової конструкції дозволяє аналізувати вплив параметрів дефектів, об'єкта контролю, умов збудження на результати контролю імпедансним методом.

Визначено, як впливає розкриття дефекту, його розміри, матеріал сотового заповнювача та обшивки на механічний імпеданс конструкції.

Механічний імпеданс конструкції розраховано за допомогою амплітудного та фазового методу.

Література

1. *Неразрушающий контроль*: Справ.: В 7 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева, И.Н. Ермолова, Ю.В. Ланге. Т. 3: Ультразвуковой контроль. – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с.
2. *Неразрушающий контроль металлов и изделий*: Справ. / Под ред. Г.С. Самойловича. – М.: Машиностроение, 1976. – 456 с.
3. *Ланге Ю.В.* Акустические низкочастотные методы и средства неразрушающего контроля многослойных конструкций. – М.: Наука, 1991. – 272 с.
4. *Ланге Ю.В.* О физических основах ультразвукового метода неразрушающей оценки прочности клеевых соединений // *Дефектоскопия*. – 1974. – № 1. – С. 96–107.
5. *Скучик Е.* Простые и сложные колебательные системы. – М.: Мир. 1971. – 557 с.

Стаття надійшла до редакції 04.07.06.