

АНАЛІЗ РЕАКЦІЇ ЕЛЕМЕНТІВ ФАНЕРИ НА УДАРНІ ВПЛИВИ

В. М. Головач, кандидат технічних наук,

*О. С. Баранова, аспірант**

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Проведено теоретичний аналіз реакції елементів фанери на ударні впливи, результатом якого є математична модель визначення дефектів матеріалу, яку може бути застосовано для оцінки резонансних частот, амплітуди та згасання коливань у разі неруйнівного контролю фанерних матеріалів.

***Ключові слова:* фанера, дефектоскопія, неруйнівний контроль, ударний метод, резонансні частоти.**

Завдання щодо істотного підвищення якості фанери можливо вирішити за умови вдосконалення виробництва і методів контролю якості продукції. Нині дедалі широкіше більше поширення отримує неруйнівний контроль продукції на окремих етапах виробництва.

Дослідження розповсюдження високочастотних хвиль у твердих тілах – один із найефективніших методів вивчення і дослідження їхньої внутрішньої структури. Акустичні хвилі легко проникають у будь-який матеріал, активно взаємодіють з атомами решітки і найчастіше надають унікальну інформацію про середовище поширення. За допомогою акустичних методів у фанері можливо знайти поверхневі та внутрішні дефекти, які являють собою порушення суцільності, неоднорідності структури, дефекти склейки тощо [1–3].

Найпоширенішим методом автоматизованого неруйнівного контролю фанери є ударно-акустичний. Він дає змогу автоматизувати процес визначення внутрішніх дефектів. Результати вимірювань можна використовувати як для селективного сортування матеріалу, так і для автоматизованого коригування технологічних процесів виготовлення матеріалу. Однак ударно-акустичний

* Науковий керівник – кандидат технічних наук В. М. Головач

метод також має суттєві недоліки, а саме: для контролю цим методом потрібні досить стабільні зовнішні умови (температура, якість поверхні матеріалу, відсутність конвекційних повітряних потоків тощо), що ускладнює конструкцію вимірювальної установки; реалізація методу порівняно дорога.

Мета досліджень – розробити нові методи неруйнівного контролю фанери.

Матеріали та методика досліджень. За основу взято метод вільних коливань, який технічно досить просто реалізувати, система може бути більш мобільною, що робить можливим її установку безпосередньо після пресування.

Результати досліджень. Під час удару по поверхні матеріалу, який можна уявляти як тонку пластину, ділянка в місці удару стиснеться і передасть сусідній ділянці коливання [4]. Сили пружності, що виникли, прискорять наступний шар і деформують його. Пружні сили, що виникли під час деформації другого шару, зупинять перший шар, а другий – набуде швидкості. Таким чином, перший шар зупиниться і повернеться в недеформований стан, а другий почне рухатися і стискатися. Деформація шарів рухатиметься по композитному матеріалу. Це явище є пружною хвилею, яка переносить початковий вплив по пластині фанери.

Існують різні види пружних хвиль: поздовжні (хвилі стиску і розтягання), поперечні (хвилі зрушення), вигинисті, поздовжні поверхневі (хвилі Релея), поперечні поверхневі (хвилі Лява) [5]. У фанері, що являє собою пластину, переважатимуть хвилі вигину, оскільки товщина матеріалу набагато менше довжини пружної хвилі, що поширюється в ньому. Ударник вимірювального пристрою, ударяючись об поверхню матеріалу, передає ділянкам матеріалу кінетичну енергію та змінює їхню внутрішню енергію.

Щільність кінетичної енергії (у Дж) ділянок фанери (пластини) у пружній хвилі, що поширюється по ній, становить [6]:

$$E_{\text{кін}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot A^2, \quad (1)$$

де ρ – щільність ділянки фанери, кг/м^3 ;

v – коливальна швидкість ділянки композитного матеріалу, м/с;

$\omega = 2\pi f$ – кругова частота коливань, 1/с;

f – частота коливання ділянки фанери;

A – амплітуда коливань, м.

Для всієї пластини фанери енергія дорівнюватиме:

$$E'_{\text{кін}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot V = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (2)$$

де V – об'єм пластини, м³;

m – маса пластини, кг.

Кінетична енергія пластини фанери під час удару по ній ударника, пропорційна кінетичній енергії ударника і залежить від його швидкості й маси. Вимірюючи коливальну швидкість v пластини фанери, можна судити про її механічні властивості, як-от наявність розшарувань.

Для визначення коливальної швидкості матеріалу використали диференціальне рівняння її коливань. Власні поперечні коливання пластини описує диференціальне рівняння [7]:

$$D \left(\frac{\partial^4 \omega}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \omega}{\partial y^4} \right) - \frac{\gamma h f_0^2 \omega}{g} = 0, \quad (3)$$

де $D = \frac{E h^3}{12(1-\nu)}$ – циліндрична жорсткість пластини на вигин, кгм;

ω – величина переміщення точки серединної площини в напрямку осі, нормальної до площини пластини, м;

x, y – осі координат;

γ – вага одиниці об'єму, кг/м³;

h – товщина пластини, м;

E – модуль пружності фанери, Н/м²;

f_0 – власна частота коливань фанери, 1/с;

g – прискорення вільного падіння, м/с²;

ν – коефіцієнт Пуассона фанери.

Рішення цього рівняння визначає форми коливань пластини. За різних крайових умов ці форми коливань будуть різними. При коливаннях поверхня пластини розділяється вузловими лініями $\omega_i(x, y)=0$ на ділянки, в яких коливання пластини відбуваються в одній або протилежних фазах.

Рівномірність властивостей по поверхні пластини фанери буде забезпечено в тому випадку, якщо вузлові лінії перетинають поверхню тільки по краях і ніде в іншому місці, тобто коли $\omega_i(x, y)=0$ тільки уздовж ліній $x=0$; $x=a$; $y=0$; $y=b$. Тут a і b – розміри пластини відповідно по осях x і y . Ці умови забезпечуються у разі, коли пластинка оперта по всіх чотирьох краях, що відповідає випадку, коли ділянки фанери розташовані над дефектом (прошарком повітря) в середині площини фанери. Форми коливань пластин, рівних за площею ділянкам фанери в місці розшарування, за таких крайових умов мають вигляд

$$\omega(x, y) = \sum_{ij} a_{ij} \cdot \frac{\sin i\pi x}{a} \cdot \frac{\sin j\pi y}{b}, \quad (4)$$

де a_{ij} – амплітуда коливань, м.

Перший член виразу (4) всередині пластини не набуває нульового значення і тільки на краях $\omega_{11}(x, y)=0$.

Отже, в цьому випадку вузлові лінії не перетинають поверхню ділянки фанери і всі її елементи коліватимуться відповідно до рівняння:

$$\begin{aligned} \omega(x, y, t) &= \omega_{11} \cdot \sin(x, y) \cdot \sin(f_0 t + \alpha) = \\ &= \alpha_{11} \cdot \sin \frac{\pi x}{a} \cdot \sin \frac{\pi y}{b} \cdot \sin(f_0 t + \alpha), \end{aligned} \quad (5)$$

де α, β – розміри пластини по осям x та y ;

t – час, с;

f_0 – власна частота коливань фанери, 1/с.

Ділянки пластини одночасно відхилятимуться в одну сторону, досягаючи максимальних значень, і одночасно проходять через рівноважне положення. Це коливання є перше власне коливання пластини. Його частоту визначають за формулою (6) [4].

$$f_{011} = \pi^2 \cdot \left(\frac{1}{\alpha^2} + \frac{1}{\beta^2} \right) \cdot \sqrt{\frac{Dg}{Yh}} \quad (6)$$

Коливання ділянки фанери, збудженої, наприклад, одиночним короткочасним ударом, поступово згаснуть. Причина згасання полягає в тому, що за вільного коливання крім пружних сил діють дисипативні сили (сили непружного опору), пов'язані з вузлами кріплення, опором зовнішнього середовища тощо.

На подолання цих непружних опорів безупинно в незворотній формі витрачається енергія, внаслідок чого загальна енергія та пікові значення коливального процесу зменшуються [7].

Криву згасаючих коливань показано на рис. 1.

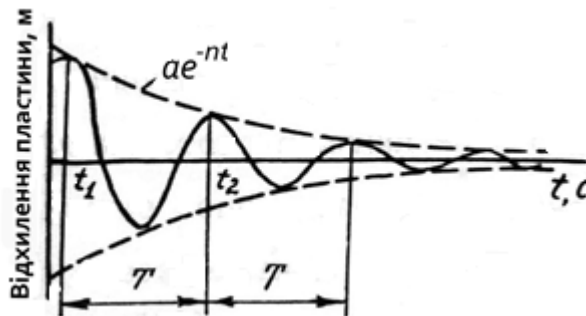


Рис 1. Крива згасаючих коливань пластини

Пікові значення коливання відповідно знаходять за формулами:

$$a_1 = a e^{-n t_1}; \quad a_2 = a e^{-n(t_1 + T)}. \quad (7)$$

де t_1 – час, що відповідає першому найбільшому відхиленню, с;

n – коефіцієнт, що характеризує в'язкість пластини, 1/с;

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{f_0^2 + n^2}} \quad \text{– тривалість коливального циклу, с.}$$

Коефіцієнт n можна визначити за формулою для логарифмічного декременту коливань [7]:

$$\delta = nT = \ln \frac{a_1}{a_{i+1}}, \quad (8)$$

З огляду на непружні опори, рівняння змушених коливань пластини під час впливу на неї сили ударника $F(t)$ можна записати в такому вигляді [1]:

$$\frac{d^2 \omega}{dt^2} + 2n \frac{d\omega}{dt} + f_0^2 \omega = \frac{F(t)}{m}, \quad (9)$$

Загальне рішення рівняння (9) має вигляд:

$$\omega = \frac{1}{mf_0^2} \int_0^t F(\tau) e^{-n(t-\tau)} \cdot \sin f_0^*(t-\tau) d\tau, \quad (10)$$

де τ – тривалість удару, с;

$F(\tau)$ – сила, що діє на пластину, Н;

$f_0^* = \sqrt{f_0^2 - n^2}$ – частота коливань пластини, 1/с.

Розглянемо дію сили $F(t)$, з якою ударник діє на пластину. Вважатимемо, що ця сила раптово прикладається в момент $t = 0$ і триває протягом t_1 , а потім також раптово зникає (рис. 2).

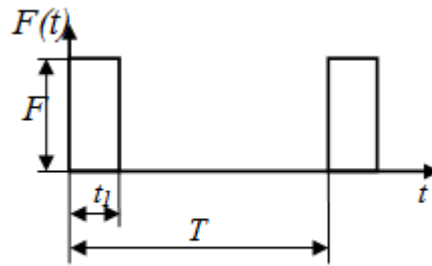


Рис. 2. Імпульс сили

Для $t > t_1$ рівняння (10) матиме вигляд:

$$\omega = \frac{1}{mf_0^2} \int_0^{t_1} F(\tau) e^{-n(t-\tau)} \cdot \sin f_0^*(t-\tau) d\tau,$$

або

$$\begin{aligned} \omega &= \frac{1}{mf_0^2} \int_0^{t_1} F(\tau) e^{-nt} \cdot e^{-n\tau} (\sin f_0^* t \cdot \cos f_0^* \tau - \cos f_0^* t \cdot \sin f_0^* \tau) d\tau = \\ &= \frac{e^{-nt}}{mf_0^2} [\sin f_0^* t \int_0^{t_1} F(\tau) e^{-n\tau} \cos f_0^* \tau d\tau - \cos f_0^* t \int_0^{t_1} F(\tau) e^{-n\tau} \sin f_0^* \tau d\tau = \\ &= \frac{e^{-nt}}{mf_0^2} [\sin f_0^* t \int_0^{t_1} F(\tau) e^{-n\tau} \cos \frac{\sqrt{(2\pi T)^2 - \delta^2 T'^2}}{\sqrt{T'T}} d\tau - \\ &\quad - \cos f_0^* t \int_0^{t_1} F(\tau) e^{-n\tau} \sin \frac{\sqrt{(2\pi T)^2 - \delta^2 T'^2}}{\sqrt{T'T}} d\tau]. \end{aligned} \quad (11)$$

де T' – період вільних коливань пластини без згасання, 1/с.

За малого згасання, що має місце, наприклад, якщо пластина без дефекту,

$T = T'$ і тоді $\frac{\tau}{\sqrt{TT'}} < \frac{t_1}{\sqrt{TT'}}$. Оскільки $\frac{\tau}{\sqrt{TT'}}$ є мале число, то можна записати

$$\omega = \frac{e^{-n\tau}}{mf_{0*}} \sin f_{0*} t \int_0^{t_1} F(\tau) e^{-n\tau} d\tau \quad (12)$$

або

$$\omega = \frac{e^{-nt} \sin f_{0*} t}{mf_{0*}} \cdot \frac{e^{-nt} - 1}{n} F_{cp} \quad (13)$$

де F_{cp} – середнє значення сили, що діє на пластину протягом t_1 , Н.

Формула (13) показує залежність величини переміщення ω точки площини в напрямку осі, нормальної до площини пластини фанери, від таких факторів, як в'язкість пластини (n), частота коливань пластини (p^*), маса пластини (m), тривалість (τ) дії ударника у момент часу t .

Вимірюючи переміщення (ω) пластини, під дією на неї сили ударника, наприклад за допомогою п'єзоелемента, що перетворює коливання ділянки пластини на електричні сигнали, дістаємо можливість вимірювати порушення однорідності (розшарування) пластини фанери за змінами параметрів цих сигналів, наприклад амплітуди, частоти, спектра.

Висновки

Встановлено, що запропонований метод дає змогу проводити неруйнівний контроль фанери за допомогою оцінки резонансних частот, амплітуди та затухання коливань. Застосування запропонованого методу допоможе значно спростити та прискорити дефектоскопію фанери та контроль якості виробів із неї.

Список літератури

1. Beall Frank C. Subsurface Sensing of Properties and Defects in Wood and Wood Products / Frank C. Beall // Subsurface Sensing Technologies and Applications. – 2000. – Vol. 1, No. 2.

2. Beall F. C. Relationship of acoustic emission during radial compression to mass loss from decay / F. C. Beall, W. W. Wilcox // For. Prod. J., 1987. – V. 37, No. 4. – P. 38–42.

3. Beall F. C. Effect of moisture conditioning on acoustic emission from particle-board / F. C. Beall // J. Acoust. Emiss., 1986. – V. 5, No. 2. – P. 71–76.

4. Защук И. В. Электроника и акустические методы испытания строительных материалов / И. В. Защук. – М. : Высшая школа, 1967. – 248 с.

5. Агранат Б. А. Ультразвук в гидрометаллургии / Б. А. Агранат, О. Д. Кириллов, Н. А. Преображенский, Н. Н. Хавский. – М. : Metallurgia, 1969. – С. 12.

6. Бабаков Н. М. Теория колебаний / Н. М. Бабаков. – М. : Наука, 1968. – С. 329–342.

7. Туричин А. И. Электрические измерения неэлектрических величин / А. И. Туричин, П. В. Новицкий, Е. С. Левишина и др. – Л. : Энергия, 1975. – 279 с.

Проведен теоретический анализ реакции элементов фанеры на ударные воздействия, результатом которого является математическая модель дефектов композитного материала, которая может быть применена для оценки резонансных частот, амплитуды и затухания колебаний при неразрушающем контроле композитных материалов.

Ключевые слова: фанера, дефектоскопия, резонансные частоты, ударный метод, неразрушающий контроль.

In the article is held the theoretical analysis of plywood materials response elements on shock effects, resulting in a mathematical model of composite material defects, which can be used to estimate the resonant frequency and damping vibrations amplitude with non-destructive testing of plywood materials.

Key words: plywood, defectoscopy, resonant frequency, shock method, nondestructive testing.