

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ГОЛОФЄЄВА Марина Олександрівна

УДК 620.1:678.7]:534-18

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАНЬ
ДИСИПАТИВНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ НЕМЕТАЛЕВИХ ГЕТЕРОГЕННИХ
МАТЕРІАЛІВ

05.01.02 – Стандартизація, сертифікація та метрологічне забезпечення

Автореферат дисертації
на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Одеса – 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Одеському національному політехнічному університеті
Міністерства освіти та науки України

Науковий керівник

доктор технічних наук, професор
Тонконогий Володимир Михайлович
Одеський національний політехнічний
університет, директор Інституту
промислових технологій, дизайну та
менеджменту

Офіційні опоненти

доктор технічних наук, доцент
Дядюра Костянтин Олександрович
Сумський державний університет,
Завідувач кафедри прикладного
матеріалознавства та технології
конструкційних матеріалів

кандидат технічних наук, доцент
Куць Віктор Романович,
Національний університет
«Львівська політехніка», доцент кафедри
метрології, стандартизації та сертифікації

Захист відбудеться **30 червня 2015 р. о 13.30** на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.052.09 в Одеському національному політехнічному університеті за адресою: 65044, м. Одеса, пр.. Шевченка, 1, ауд. 400-А.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Одеського національного політехнічного університету за адресою: 65044, м. Одеса, пр. Шевченка, 1.

Автореферат розісланий ____ травня 2015 р.

Вчений секретар
спеціалізованої ради

В.П. Гугнін

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Для забезпечення випереджуючого розвитку машинобудування необхідне інтенсивне використання нових конструкційних матеріалів. Все більше застосування знаходять різного виду гетерогенні матеріали та структури, які складаються з двох або більше компонентів (армуючого наповнювача та полімерної матриці) та мають специфічні фізико-механічні властивості, відмінні від сумарних властивостей складових компонентів.

Ефективне використання таких матеріалів та конструкцій з них потребує вимірювання достовірних значень характеристик дисипації, а також закономірності їх змінення в процесі навантаження. Неметалеві гетерогенні матеріали є достатньо складними об'єктами для контролю, оскільки характеризуються анізотропією властивостей, великою різноманітністю типів структур, специфічними фізичними властивостями (електро-, тепло-, звукоізоляційними).

Розсіювання енергії в конструкціях із неметалевих гетерогенних матеріалів сильно залежить від структури матеріалу, характеру напруженого стану, наявності та характеристик закладних деталей, амплітуди та частоти коливань. Вибір експериментального метода визначення дисипативних властивостей повинен базуватися на моделі, що передбачає дію реально існуючих механізмів розсіювання енергії, які характерні для досліджуваного матеріалу.

Треба зазначити розходження довідникових даних щодо характеристик дисипації для одних і тих самих матеріалів. Це свідчить, в першу чергу, про недосконалість методів дослідження розсіювання енергії, що не враховують зазначених особливостей.

Використання відомих експериментальних методів дослідження дисипативних властивостей неметалевих гетерогенних матеріалів, для яких характерні складні процеси розсіювання енергії, призводить до значних похибок та не дає можливості визначити вплив кожного з окремо діючих механізмів дисипації енергії.

Невирішеною залишається також проблема визначення особливостей динамічної поведінки неметалевих гетерогенних матеріалів та елементів конструкцій з них в залежності від особливостей експлуатації, а саме: амплітуди та частоти вимушених коливань, характеристик напружено-деформованого стану матеріалу, структури та анізотропії його властивостей, наявності та характеристик закладних деталей. Тому з метою підвищення вібробійкості виробів з таких матеріалів вельми **актуальною** є розробка методів визначення дисипативних властивостей неметалевих гетерогенних матеріалів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація виконувалася відповідно до завдань відповідних розділів науково-дослідних робіт Одеського національного політехнічного університету № 689-33 «Підвищення вібробійкості технологічної системи

сучасного металорізального устаткування з застосуванням адаптивного керування приводом головного руху» (№ державної реєстрації 0113U001459), № 684-31 «Розробка методів підвищення ефективності вітроенергетичних комплексів» (№ державної реєстрації 0113U001454).

Мета та задачі дослідження. Метою роботи є розробка та впровадження методів вимірювання дисипативних властивостей неметалевих гетерогенних матеріалів для підвищення вібростійкості виробів з таких матеріалів.

Для досягнення цієї мети в роботі були поставлені та **вирішені такі задачі:**

- встановлений комплекс факторів, що впливають на дисипативні властивості неметалевих гетерогенних матеріалів;
- отримані параметри взаємодії пружних хвиль із неметалевими гетерогенними матеріалами;
- розроблений акустичний метод вимірювання дисипативних властивостей неметалевих гетерогенних матеріалів, заснований на визначенні швидкості розповсюдження пружних хвиль, які проходять через матеріал, що досліджується;
- запропоноване метрологічне забезпечення вимірювання декременту затухання коливань в неметалевих гетерогенних матеріалах, визначені основні метрологічні характеристики розробленого методу;
- виконані практичні випробування та впровадження результатів дослідження в умовах машинобудівного виробництва з позитивним ефектом.

Об'єктом дослідження є процес вимірювання дисипативних властивостей неметалевих гетерогенних матеріалів.

Предметом дослідження є методи та засоби вимірювання дисипативних властивостей неметалевих гетерогенних матеріалів.

Методи дослідження: Теоретичні методи дослідження базуються на сучасних положеннях теорії вимірювань, фундаментальних положеннях в галузі неруйнівного контролю, математичному аналізі. При виявленні залежності дисипативних властивостей від модуля пружності матеріалу використовувався метод регресійного аналізу.

Для практичного підтвердження на виробництві ефективності розробленого методу вимірювання дисипативних властивостей неметалевих гетерогенних матеріалів були використані лабораторні засоби та виробничі потужності одеської компанії ХК «Мікрон».

Наукова новизна одержаних результатів полягає в розробці та розвитку методів вимірювання дисипативних властивостей неметалевих гетерогенних матеріалів:

- вперше запропонований метод вимірювання дисипативних властивостей неметалевих гетерогенних матеріалів, що полягає в вимірюванні швидкості розповсюдження пружної хвилі, яка залежить від фізико-механічних властивостей і структури матеріалів та параметрів вимушених коливань, що дозволяє визначити декремент затухання коливань в різних напрямках їх розповсюдження;

– отримав подальший розвиток метод вимірювання швидкості розповсюдження пружної хвилі в неметалевих гетерогенних матеріалах, що розповсюджується після ударного навантаження, який полягає у вимірюванні різниці в часі сигналів від двох віброакустичних датчиків, розташованих на фіксованій відстані один від одного;

– вперше встановлена залежність дисипативних властивостей виробів із неметалевих гетерогенних матеріалів від наявності та характеристик закладних деталей, що дозволяє за рахунок проектних рішень, прийнятих на основі даних вимірювань, підвищити вібростійкість таких виробів;

– вперше запропонована математична модель, що встановлює зв'язок між декрементом затухання коливань в неметалевих гетерогенних матеріалах та модулем пружності;

– отримали подальший розвиток математичні моделі частотної та силової залежностей декременту затухання коливань та модель перетворення акустичної хвилі під час проходження через неметалевий гетерогенний матеріал, який полягає у врахуванні фізико-механічних властивостей гетерогенних матеріалів.

Практичне значення одержаних результатів. Теоретично обґрунтована та експериментально підтверджена можливість використання метода вимірювання дисипативних властивостей неметалевих гетерогенних матеріалів, заснованого на залежності швидкості розповсюдження пружних хвиль від структури та фізико-механічних властивостей матеріалів.

Запропонований метод, а також моделі, розроблені для його реалізації, впроваджені до навчального процесу Одеського національного політехнічного університету і використовуються в дисциплінах, що присвячені методам та засобам вимірювання, а також в курсовому та дипломному проектуванні.

Метод вимірювання дисипативних властивостей неметалевих гетерогенних матеріалів був впроваджений на ХК «Мікрон». Використання вказаного методу визначення характеристик розсіювання енергії коливань виробів дозволило за рахунок проектних рішень, прийнятих на основі вимірювальних даних, підвищити вібростійкість базових деталей верстатів приблизно на 15 %, що в свою чергу призвело до покращення показників точності верстатів.

Особистий внесок здобувача полягає в аналізі та розробці методу вимірювання дисипативних властивостей неметалевих гетерогенних матеріалів [1-16], розробці математичних моделей, що відображають залежність дисипативних властивостей від модуля пружності матеріалу [7, 16] та пов'язують декремент затухання коливань в синтеграні з величиною навантаження та частотою вимушених коливань [7]. Розроблені метод та математичні моделі випробувані автором в лабораторних та виробничих умовах [7].

Апробація результатів дисертації. Матеріали роботи доповідалися та обговорювалися на XVII семінарі «Моделювання в прикладних наукових дослідженнях» (Одеса, 2009); XVII Міжнародному науково-технічному

семінарі «Високі технології: тенденції розвитку – Інтерпартнер – 2009»; IX Міжнародній науково-практичній конференції «Найновите научни постижения» (Софія, 2013); IX Міжнародній науково-практичній конференції «Zprávy vědecké ideje – 2013» (Прага, 2013); IX Міжнародній науково-практичній конференції «Vědecký průmysl evropského kontinentu–2013» (Прага, 2013); XXII Міжнародному науково-технічному семінарі «Високі технології: тенденції розвитку – Інтерпартнер – 2014», Міжнародній науково-практичній конференції «Развитие науки и образования в современном мире» (г. Москва, 30 сентября 2014 г.).

Публікації. Результати дисертації викладені в 16 публікаціях, зокрема – 2 у закордонних періодичних виданнях, в 6 статтях в журналах з переліку спеціальних видань МОН України (3 з яких входять до міжнародних наукометричних баз *eLIBRARY*, *Index Copernicus*, *Ulrich's Periodicals Directory*, *CrossRef*), 2 – в збірниках наукових праць, а також в 6 матеріалах конференцій та семінарів.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів та додатків. Об'єм дисертації – 138 стор, з них основного тексту – 130 стор. Дисертація містить 36 рисунків, 14 таблиць та перелік посилань до 156 наукових джерел.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У вступі наведена загальна характеристика роботи, яка підкреслює її актуальність, відповідність державним науковим програмам, вимогам МОН України, наукову новизну та практичне значення; визначені об'єкт та предмет дослідження, сформульовані його мета і задачі, особистий внесок автора.

У першому розділі проаналізовані матеріали літературних джерел з сучасних проблем виробництва виробів з неметалевих гетерогенних матеріалів та існуючого метрологічного забезпечення виробництва таких матеріалів, зокрема, був сформований комплекс параметрів відливок із неметалевих гетерогенних матеріалів, які підлягають контролю, та визначені проблеми їх вимірювань, розглянуті існуючі методи вимірювань дисипативних властивостей таких матеріалів. Показана можливість використання акустичного методу дослідження дисипативних характеристик неметалевих гетерогенних матеріалів, заснованого на вимірюванні швидкості розповсюдження пружних хвиль, які проходять через зразок матеріалу, що досліджується. На цій підставі виконано постановку задач дослідження.

В другому розділі представлені основи побудови та застосування методу вимірювання дисипативних властивостей неметалевих гетерогенних матеріалів.

Акустичний метод заснований на простому фізичному принципі: рух будь-якої хвилі залежить від характеристик матеріалу, через який проходить її переміщення. Отже, зміна одного або декілька з чотирьох параметрів

пружної хвилі, що проходить через матеріал (швидкість розповсюдження, поглинання, розсіювання та частотний спектр), може бути пов'язана зі зміною таких фізичних властивостей як твердість, модуль пружності, щільність, однорідність або зернистість структури. Найбільш доступним для вимірювання акустичним параметром є швидкість звуку. Вона на пряму визначається модулем пружності, коефіцієнтом Пуассона та щільністю матеріалу. Більш того, на швидкість звуку також впливає і структура матеріалу, його температура та напружено-деформований стан.

Залежності швидкості розповсюдження повздовжніх та поперечних хвиль у синтеграні від його фізико-механічних характеристик:

$$c_1 = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho}}, \quad (1)$$

$$c_2 = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}, \quad (2)$$

де c_1 – швидкість розповсюдження повздовжніх хвиль, м/с;

c_2 – швидкість розповсюдження поперечних хвиль, м/с;

E – модуль пружності матеріалу, ГПа;

ν – коефіцієнт Пуассона матеріалу;

ρ – щільність матеріалу, кг/м³.

Акустичні хвилі при проходженні через неметалеве гетерогенне середовище взаємодіють з великою кількістю неоднорідностей, які відрізняються одна від одної. Все це позначається на картині акустичного поля. Розглянемо змінення форми акустичного імпульсу при проходженні через неметалевий гетерогенний матеріал. За допомогою п'єзоелектричних ультразвукових датчиків отримали два сигнали. На перший датчик надходить сигнал $u_1(t)$, на другий – сигнал зміненої форми $u_2(t, C, \beta)$, де t – час, C – швидкість розповсюдження пружної хвилі, β – коефіцієнт згасання пружних хвиль. Процес змінення форми сигналу можна описати співвідношенням:

$$u_2(t, C, \beta) = K_1 K_2 K_3 u_1(t), \quad (3)$$

де K_1 – коефіцієнт врахування впливу апаратури;

K_2 – коефіцієнт врахування умов вимірювання;

K_3 – коефіцієнт врахування акустичних характеристик матеріалу.

Оскільки умови вимірювання та апаратура, що використовується для отримання обох сигналів однакові, то $K_1 = K_2 = 1$. В свою чергу, коефіцієнт K_3 має фізичну сутність акустичного відображення матеріалу. Для пласкої монохроматичної пружної хвилі коефіцієнт K_3 розраховується так:

$$K_3 = e^{-\beta S} \sin[2\pi f(t - S/C)], \quad (4)$$

де S – база прозвучування, м;

f – частота коливань, Гц.

Декремент затухання та коефіцієнт затухання коливань пов'язані співвідношенням:

$$\beta = \frac{\lambda}{T} = \lambda f, \quad (5)$$

де T – період коливань, с.

Підставивши (2) та (5) в рівняння (4) отримуємо залежність коефіцієнта K_3 від параметрів матеріалу:

$$K_3 = e^{-\lambda S} \sin \left[2\pi f \left(t - S / \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \right) \right]. \quad (6)$$

Враховуючи, що під час збудження коливань в неметалевих гетерогенних матеріалах виникає цілий ряд мод коливань, то вимірювальний сигнал представляє собою комбінацію гармонічних компонентів, кожний з яких має свою амплітуду та частоту і поєднується в різноманітних співвідношеннях з іншими компонентами. Тому коефіцієнт врахування акустичних характеристик неметалевого гетерогенного матеріалу буде дорівнювати сумі коефіцієнтів, що характеризують зміну кожної моди коливань, тобто:

$$K_3 = \sum_{i=1}^n e^{-\lambda_i f_i S} \sin \left[2\pi f_i \left(t - S / \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \right) \right], \quad (7)$$

де i – кількість мод коливань в сигналі.

Тоді модель, що описує перетворення акустичної хвилі при проходженні через неметалевий гетерогенний матеріал та враховує його фізико-механічні характеристики можна записати так:

$$u_2(t, E, \rho, \nu, \lambda) = u(t) \cdot \sum_{i=1}^n e^{-\lambda_i f_i S} \sin \left[2\pi f_i \left(t - S / \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \right) \right]. \quad (8)$$

При вимірюваннях швидкості розповсюдження пружних хвиль використовувався стенд «Дельфін-1М». Сигнали з датчиків, яких може бути не більше восьми, вводяться до блоку електроніки, що забезпечує комутацію, узгодження, попередню фільтрацію та введення даних до комп'ютеру за допомогою аналогово-цифрового перетворювача. Частота опитування кожного каналу – 70 кГц.

Точність вимірювання швидкості розповсюдження акустичних хвиль в матеріалі, а відповідно, і їх дисипативних властивостей, обмежується частотою опитування каналів. Враховуючи, що частота опитування каналів за допомогою діагностичного комплексу «Дельфін-1М» 70 кГц, то шаг квантування за часом 14 мкс, що призводить до появи похибки квантування в 7 мкс. Таке значення похибки квантування призводить до сумарної похибки більше, ніж в 30 %, що є неприпустимим. Виникає необхідність, особливо у випадках, коли неможливо забезпечити достатньо велику базу прозвучування (при порівняно малих розмірах об'єктів контролю), зменшення такої похибки. З метою досягнення необхідної точності вимірювання дисипативних властивостей неметалевих гетерогенних матеріалів було прийнято рішення підвищити частоту опитування вимірювальних каналів програмними методами. Діагностичний комплекс «Дельфін-1М» призначений для аналізу даних, що надходять з восьми каналів. Опитування каналів здійснюється послідовно від першого до восьмого. В роботі існує необхідність отримування даних тільки з двох вимірювальних каналів. З урахуванням зазначеного, була виконана модернізація діагностичного

комплексу «Дельфін-1М», під час якої мікроконтролер запрограмовано таким чином, щоб провадилося опитування тільки двох вимірювальних каналів. В результаті такої модернізації вдалося підвищити частоту опитування каналів в чотири рази (з 70 кГц до 240 кГц). Завдяки збільшенню частоти опитування вимірювальних каналів в чотири рази вдалося зменшити похибку квантування за часом з 7 мкс до 1,8 мкс, що призвело до зменшення сумарної похибки до $\pm 7,4\%$.

У третьому розділі представлені розробка та функціонування методу вимірювання дисипативних властивостей неметалевих гетерогенних матеріалів.

Методика визначення декременту затухання коливань в неметалевих гетерогенних матеріалах. Метод дослідження дисипативних властивостей неметалевих гетерогенних матеріалів заснований на взаємозв'язку декременту затухання коливань та швидкості розповсюдження пружних хвиль в матеріалі. При виявленні залежності дисипативних властивостей від модуля пружності використовувався метод регресійного аналізу. Отримана в результаті аналізу залежність декременту затухання коливань від модуля пружності матеріалу, наведена на рисунку 1.

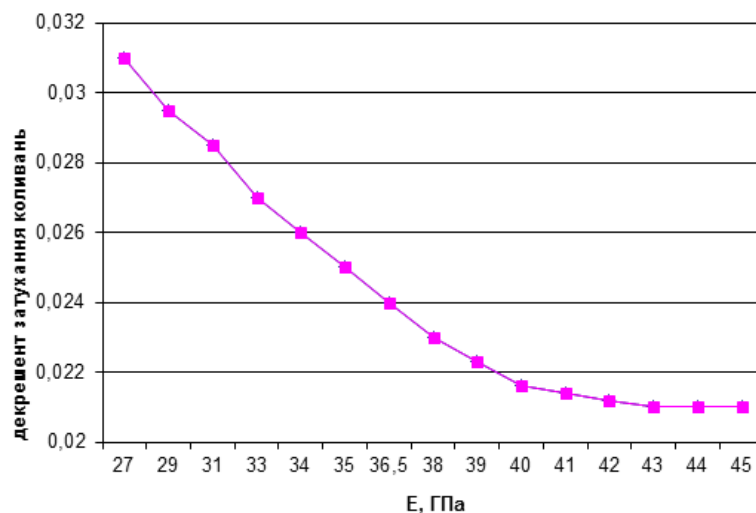


Рисунок 1 – Залежність декременту затухання коливань від модуля пружності матеріалу

В результаті аналізу було встановлено, що найкраще зв'язок декременту затухання коливань та модуля пружності неметалевого гетерогенного матеріалу описується моделлю на базі поліному:

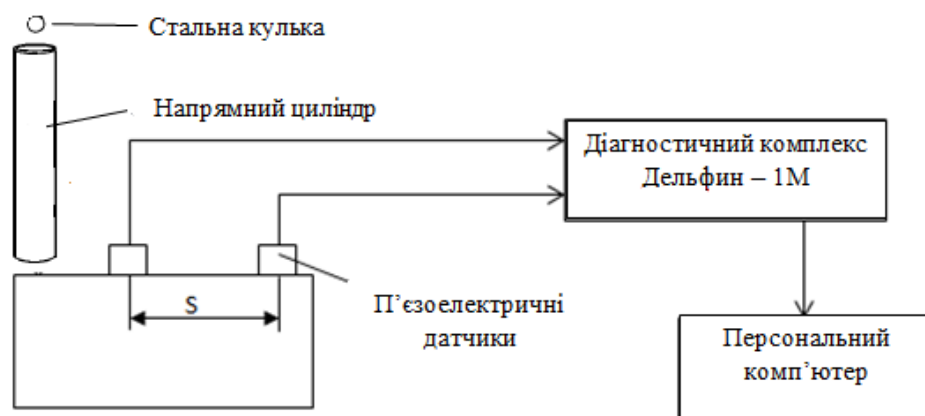
$$\lambda = 2,076 \cdot 10^{-5} \cdot E^2 - 2,109 \cdot 10^{-3} \cdot E + 0,073, \quad (9)$$

де λ – декремент затухання коливань;
 E – модуль пружності матеріалу, ГПа

Підставивши формулу (2) у формулу (9) отримуємо залежність декременту затухання коливань від швидкості розповсюдження пружних хвиль в синтеграні:

$$\lambda = 8,304 \cdot 10^{-5} \cdot \rho^2 \cdot (1 + \nu)^2 \cdot C^4 - 4,218 \cdot 10^{-3} \cdot \rho \cdot (1 + \nu) \cdot C^2 + 0,073, \quad (10)$$

На рисунку 2 представлена схема вимірювання швидкості пружної поперечної хвилі, що проходить через зразок матеріалу.



S – база прозвучування

Рисунок 2 – Схема вимірювання швидкості розповсюдження акустичної хвилі

Зразок із досліджуваного матеріалу консольно закріплюється. На ньому, на фіксованій відстані S (база прозвучування), встановлюються ідентичні за розмірами та масою віброакустичні п'єзоелектричні датчики АВС 117, за допомогою яких отримуються сигнали, що пропорційні переміщенню. Зразок піддається ударному навантаженню. Тарований удар наноситься шляхом падіння стальної кульки діаметром 40 мм з висоти 200 мм. Для забезпечення падіння кульки в необхідну точку поверхні об'єкта контролю використовується напрямний циліндр, що встановлюється перпендикулярно до поверхні.

Швидкість розповсюдження пружних хвиль в неметалевому гетерогенному матеріалі визначається імпульсним методом за різницею в часі сигналів від віброакустичних датчиків у відповідності із формулою:

$$C = \frac{S}{\Delta t}, \quad (11)$$

де S – відстань між датчиками (база прозвучування), м;

$\Delta t = t_1 - t_2$ – різниця в часі сигналів від віброакустичних датчиків, с;

t_1 и t_2 – час надходження акустичного сигналу на перший та другий датчик відповідно, с.

На рисунку 3 в якості прикладу для пояснення методу вимірювання наведені сигнали, отримані з датчиків за допомогою діагностичного стенду «Дельфін-1М».

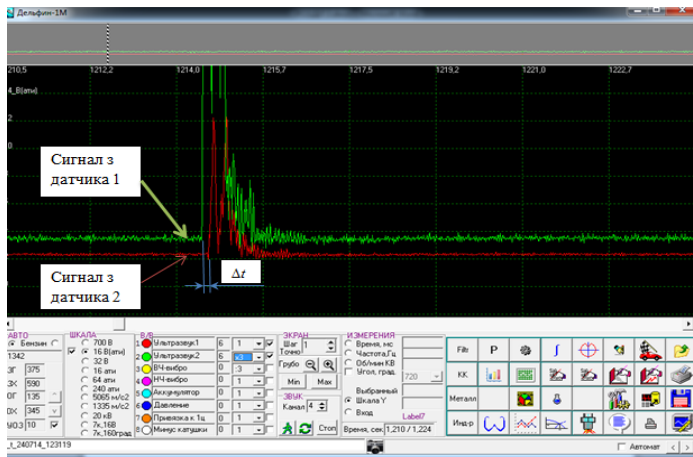


Рисунок 3 – Сигнали, отримані за допомогою стану «Дельфін-1М»

Методика вимірювання декременту затухання коливань виробів.

Розроблений метод може використовуватися не тільки для визначення дисипативних властивостей зразків матеріалу, але і при дослідженні характеристик розсіювання енергії в готових виробах. В якості об'єкта дослідження був обраний фрезерний верстат серії ОММ виробництва ХК Мікрон. Базові деталі такого верстата вироблені з синтеграну, що забезпечує розмірну та геометричну точність, низьку шорсткість оброблених поверхонь. Були проведені дослідження двох поверхонь об'єкта контролю. Для дослідження анізотропії дисипативних характеристик проводилися вимірювання швидкості пружних хвиль в одній площині в різних напрямках.

За результатами вимірювання можна констатувати відсутність анізотропії характеристик розсіювання енергії в двох напрямках дослідження поверхонь об'єкта контролю. Необхідно також відмітити невелику різницю в результатах вимірювання декременту затухання коливань при дослідженні різних поверхонь об'єкта контролю. Це, на наш погляд, пов'язано з різним напружено-деформованим станом досліджених поверхонь та наявністю закладних елементів різної конструкції.

Методика дослідження залежності декременту затухання коливань в неметалевих гетерогенних матеріалах від характеристики механічний напружень. Головним фактором, що впливає на зміну характеристик акустичних хвиль є змінення міжатомної відстані, тобто, в кінцевому рахунку, – деформація об'єкта контролю. Задачею дослідження було встановлення залежності декременту затухання коливань в зразках із синтеграну, що визначається швидкістю розповсюдження акустичних хвиль, від прикладеного навантаження. Розглядався випадок однорідного стискання. До складу стану входить:

- діагностичний стенд «Дельфін-1М»;
- цифровий вимірювач деформації (серійний номер ИДУ-1), що дає разом з тензорезисторами можливість вимірювання відносного осьового подовження зразка;
- пристрій навантаження, що забезпечує прикладання до зразка одноосьового навантаження (тиски).

Основною перевагою даного метода є можливість дослідження демпфування в різноманітних напрямках розповсюдження коливань, що є особливо важливим для складних композиційних структур, в яких затухання визначається складом, розподілом фракцій об'ємом матеріалу, а також наявністю різноманітних дефектів.

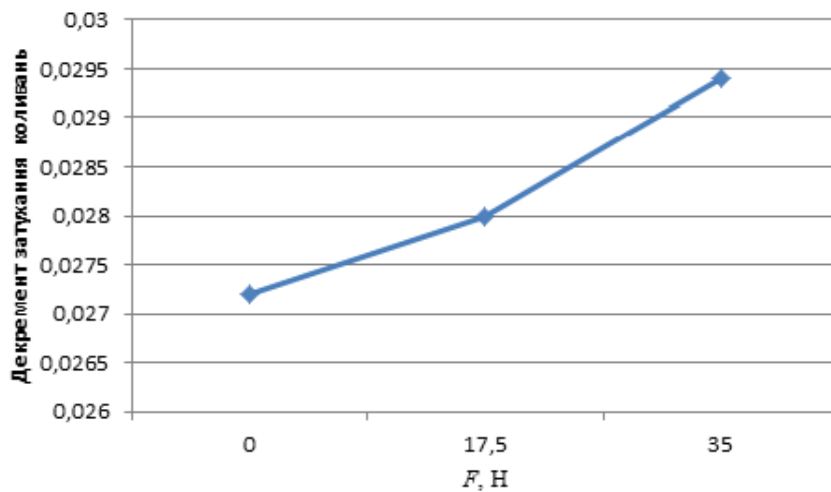


Рисунок 4 – Залежність декременту затухання коливань в синтеграні від навантаження

На рисунку 4 представлена залежність декременту затухання коливань від навантаження. Можна відмітити, що декремент затухання коливань в синтеграні з ростом навантаження хоч і не суттєво, але зростає.

Аналіз показав, що найкраще залежність декременту затухання коливань в синтеграні від навантаження описується моделлю виду:

$$\lambda = 6 \cdot 10^{-5} \cdot F + 0.0272 \quad , \quad (12)$$

де F – навантаження, Н.

Методика дослідження частотної залежності декременту затухання коливань в неметалевих гетерогенних матеріалах. Розроблена методика дозволяє вимірювати декремент затухання коливань в неметалевих гетерогенних матеріалах на довільній частоті та амплітуді збудження. Відсутні трудомісткі операції з визначення резонансної та власної частот коливань, ширини резонансного піку або западини. Це дає можливість дослідження залежностей характеристик розсіювання енергії в матеріалі від параметрів коливань.

Зразки досліджуваного матеріалу закріплюються на вібростолі, який дозволяє змінювати частоту коливання. На зразок наклеюються два однакові за масою та розмірами ультразвукові п'єзоелектричні датчики, за допомогою яких вимірюється швидкість пружних хвиль, що поширюються в матеріалі.

На рисунку 5 представлена залежність декременту затухання коливань від частоти. З результатів вимірювання видно, що декремент затухання коливань збільшується з ростом частоти коливань зразка.

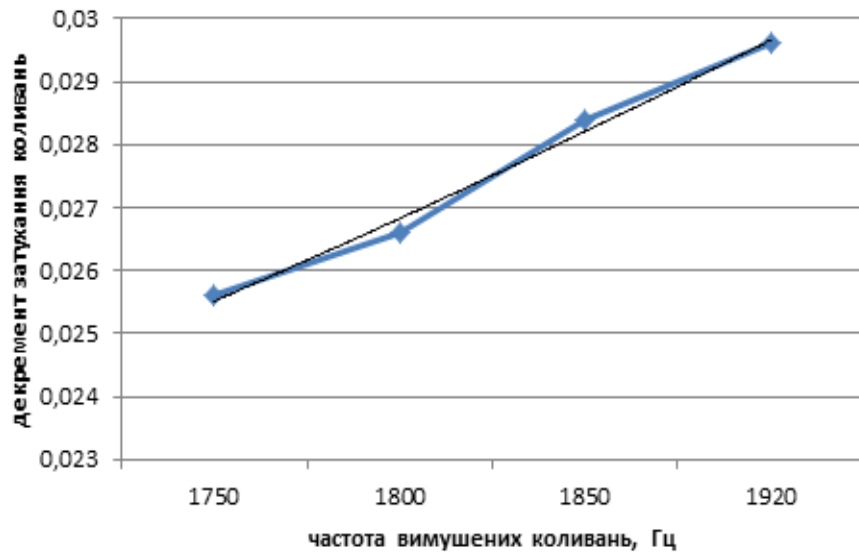


Рисунок 5 – Залежність декременту затухання коливань від частоти

В результаті аналізу було виявлено, що найкраще залежність декременту затухання коливань від частоти описується моделлю типу:

$$\lambda = 2,35 \cdot 10^{-5} f - 0,0155, \quad (13)$$

де f – частота вимушених коливань зразка із синтеграну, Гц.

В четвертому розділі розглянуті основні характеристики та результати використання запропонованого метода.

Дослідження метрологічних характеристик метода вимірювання дисипативних властивостей неметалевих гетерогенних матеріалів. При оцінюванні метрологічних характеристик метода вимірювання дисипативних властивостей неметалевих гетерогенних матеріалів основним інформативним параметром є C – швидкість розповсюдження поперечної пружної хвилі, тобто чутливість метода буде визначатися по відношенню до C . На виході методу – декремент затухання коливань в неметалевому гетерогенному матеріалі λ .

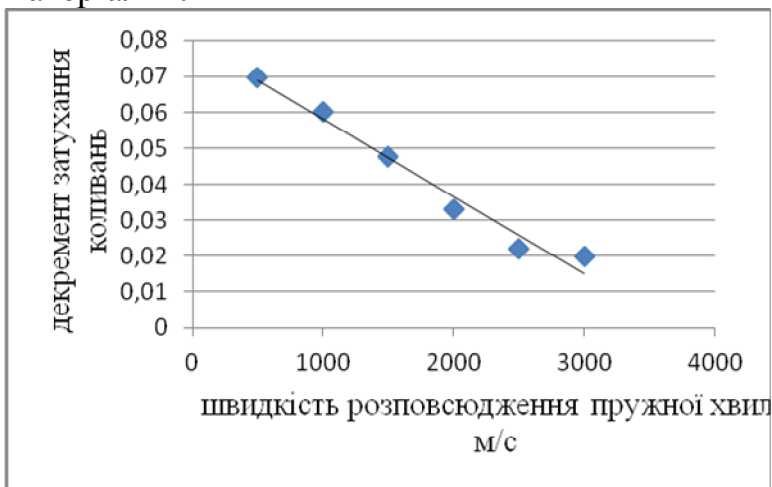


Рисунок 6 – Градувальна характеристика метода

На рисунку 6 наведена градувальна характеристика запропонованого метода. Середня чутливість метода вимірювання визначається так:

$$S = \frac{\Delta\lambda}{\Delta C}, \quad (14)$$

де S – чутливість метода вимірювання дисипативних властивостей неметалевих гетерогенних матеріалів, $(\text{м/с})^{-1}$;

$\Delta\lambda$ – змінення декременту

затухання коливань;

ΔC – змінення швидкості розповсюдження пружної поперечної хвилі, м/с.

$$S = 0.00002 \frac{1}{\text{м/с}}$$

Запропонований метод вимірювання характеристик розсіювання енергії в неметалевих гетерогенних матеріалах є опосередкованим з великою кількістю перетворень вимірюваної величини від об'єкта дослідження до його результатів (рис. 7).



Рисунок 7 – Блок-схема перетворень вимірюваної величини в запропонованому методі вимірювання дисипативних властивостей неметалевих гетерогенних матеріалів

Це, як відомо призводить до накоплення похибки вимірювання на кожному етапі перетворень.

Відносна похибка опосередкованих вимірювань визначається за формулою:

$$\delta f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 \cdot \delta x^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 \cdot \delta y^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 \cdot \delta z^2 + \dots}, \quad (15)$$

де δf – похибка шуканої величини;

x, y, z – результат прямих вимірювань інших фізичних величин, з якими пов'язана шукана величина встановленою функціональною математичною залежністю;

$\delta x, \delta y, \delta z$ – абсолютні похибки вимірювань величин x, y, z .

$\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right), \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right), \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)$ – частинні похідні функції f за аргументами x, y, z .

Похибка опосередкованих вимірювання швидкості розповсюдження пружних хвиль:

$$\delta C = \sqrt{(-\delta t)^2 + (\delta l)^2} \approx 5\%. \quad (16)$$

Абсолютна похибка визначення модуля пружності:

$$\Delta E = \sqrt{(2 \cdot C^2 \cdot [1 + \nu])^2 \cdot \Delta \rho^2 + (2 \cdot C^2 \cdot \rho)^2 \cdot \Delta \nu^2 + (4 \cdot C \cdot \rho \cdot [1 + \nu])^2 \cdot \Delta C^2} = \pm 2 \text{ ГПа}. \quad (17)$$

Похибка опосередкованих вимірювань декременту затухання коливань:

$$\Delta \lambda = \sqrt{(0,0004152 \cdot E + 2,109 \cdot 10^{-3})^2 \cdot \Delta E^2} = \pm 0,002. \quad (18)$$

У відносній формі запишемо: $\delta \lambda_{\text{сист}} = \pm 7,4\%$.

Виробничі випробування та практичні результати досліджень. Виробничі випробування результатів досліджень були проведені на ТОВ «Холдингова компанія Мікрон» (м. Одеса). Стабільність і точність роботи верстатів визначається не тільки загальною жорсткістю базових деталей, але і жорсткістю кріплення закладних металевих деталей. Проводилися вимірювання декременту затухання коливань синтетранових зразків із закладними, що представляють собою чавунну планку, на якій розташовані анкери у вигляді стрижневої арматури періодичного профілю та ребер жорсткості. На планку в подальшому кріпилася напрямна. В ході випробувань досліджувалася залежність дисипативних властивостей зразків від конструкції та кількості анкерів.

Використання вказаного методу вимірювання дисипативних властивостей виробів дозволило за рахунок проектних рішень, прийнятих на основі вимірювальних даних, підвищити вібростійкість базових деталей верстатів приблизно на 15 %, що в свою чергу призвело до покращення показників точності верстатів.

ВИСНОВКИ

1. Ефективне використання неметалевих гетерогенних матеріалів та конструкцій з них потребує визначення достовірних значень характеристик демпфування, а також закономірності їх змінення в процесі навантаження. Розсіювання енергії в матеріалі сильно залежить від його структури, характеру напруженого стану, а також амплітуди та частоти коливань. Неметалеві гетерогенні матеріали характеризуються складними процесами розсіювання енергії за рахунок внутрішнього демпфування у в'язкій матриці та жорсткому наповнювачі, а також конструкційного розсіювання на границях розподілу матриця – наповнювач. На динамічні характеристики конструкції також здійснюють вплив геометрія об'єкта та параметри закладних деталей. Причому, помилки при їх проектуванні можуть призвести до суттєвого зниження вібростійкості виробу в цілому.

2. При дослідженні дисипативних властивостей неметалевих гетерогенних матеріалів використання відомих експериментальних методів призводить до значних похибок та не дає можливості визначити вплив кожного з окремо діючих механізмів розсіювання енергії. Доведена можливість використання акустичного методу дослідження дисипативних властивостей неметалевих гетерогенних матеріалів, заснованого на вимірюванні швидкості розповсюдження пружних хвиль, які проходять через зразок матеріалу, що досліджується. Такий метод дає можливість виявити залежність демпфування від амплітуди та частоти коливань та напружено-деформованого стану матеріалу.

3. В неметалевих гетерогенних матеріалах збудження однієї моди викликає виникнення цілого набору інших мод коливань, що розповсюджуються різними шляхами та з різною швидкістю і підсумовуючись на приймачі, змінюють форму прийнятого сигналу. Найбільш інформативною є початкова частина імпульсу, вільна від паразитних мод коливань. Тому вимірювання проводяться за фронтом сигналу. Розроблена математична модель, що описує перетворення акустичної хвилі при проходженні через неметалевий гетерогенний матеріал в залежності від його фізико-механічних характеристик.

4. На підставі сформульованих мети та задач дослідження розроблений метод дослідження дисипативних властивостей неметалевих гетерогенних матеріалів заснований на взаємозв'язку декременту затухання коливань та швидкості розповсюдження пружних хвиль в матеріалі. Встановлена залежність дисипативних властивостей від модуля пружності матеріалу. Основною перевагою запропонованого метода є можливість дослідження демпфування в різноманітних напрямках розповсюдження коливань, що є особливо важливим для складних композиційних структур. Метод може використовуватися не тільки для визначення дисипативних властивостей зразків матеріалу, але і при дослідженні характеристик розсіювання енергії в готових виробах.

5. Розроблений метод визначення дисипативних властивостей неметалевих гетерогенних матеріалів дозволяє досліджувати залежність декременту затухання коливань від прикладеного навантаження та частоти вимушених коливань.

6. Досліджені метрологічні характеристики розробленого метода вимірювання. Середня чутливість запропонованого метода вимірювання, яка розраховується як відношення змінення швидкості розповсюдження пружної поперечної хвилі до змінення декременту затухання коливань, складає $0,00002 \text{ (м/с)}^{-1}$. Підвищена точність вимірювання швидкості розповсюдження акустичної хвилі в матеріалі за рахунок зменшення похибки квантування в чотири рази шляхом збільшення частоти опитування вимірювальних каналів програмним методом. Запропонований метод вимірювання дисипативних властивостей неметалевих гетерогенних матеріалів є опосередкованим з великою кількістю перетворень вимірюваної величини від об'єкта дослідження до його результатів. Це призводить до накопичення похибки

вимірювання на кожному етапі перетворень. Розрахована систематична похибка вимірювання, яка складає $\pm 7,4\%$.

7. На ТОВ «Холдингова компанія Мікрон» (м. Одеса) були проведені виробничі випробування запропонованого метода дослідження дисипативних властивостей неметалевих гетерогенних матеріалів. Вимірюванням підлягав декремент затухання коливань в зразках із синтеграну із закладними деталями різних конструкцій. Використання вказаного методу вимірювання дисипативних властивостей виробів дозволило за рахунок проектних рішень, прийнятих на основі вимірювальних даних, підвищити вібростійкість базових деталей верстатів приблизно на 15%, що в свою чергу призвело до покращення показників точності верстатів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

1. Тонконогий, В.М. Применение синтеграну в машиностроении / В.М. Тонконогий, М.А. Голофеева, И.А. Усатая // Резание и инструмент в технологических системах: Международный науч.-техн. Сборник, - Харьков: НТУ «ХПИ», 2009. – Вып. 77. – С. 167-172.

Видання входить до міжнародної наукометричної бази Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA).

Здобувачу належить аналіз можливості використання того чи іншого метода для контролю параметрів неметалевих гетерогенних матеріалів.

2. Тонконогий В.М. Определение допуска на угол преломления ультразвукового луча при исследовании параметров качества изделий из синтеграну / В.М. Тонконогий, М.А. Голофеева // Праці Одеського політехнічного університету, 2013. Вип. 2(41). – С. 112-116.

Видання входить до міжнародних наукометричних баз eLIBRARY, Index Copernicus

Здобувачу належить розробка метода вимірювання параметрів якості неметалевих гетерогенних матеріалів.

3. Тонконогий В.М. Составление бюджета неопределенностей при ультразвуковом методе контроля качества изделий из синтеграну / В.М. Тонконогий, М.А. Голофеева, В.А. Балан // Праці Одеського політехнічного університету, 2013. Вип. 3(42). – С 28-32

Видання входить до міжнародних наукометричних баз eLIBRARY, Index Copernicus, CrossRef.

Здобувачу належить розробка метода вимірювання параметрів якості неметалевих гетерогенних матеріалів.

4. Голофеева М.А. Акустический метод контроля синтеграновых

изделий // Проблемы техники: научно-виробничий журнал, - Одеса. – 2013. - №3 – С. 119-124.

Здобувачу належить розробка метода вимірювання параметрів якості неметалевих гетерогенних матеріалів.

5. Голофеева М.А. Определение допуска на перемещение приемника ультразвукового луча при исследовании синтеграна / М.А. Голофеева, В.М. Тонконогий // Проблемы техники: научно-виробничий журнал, - Одеса. – 2013. - №4 – С. 133-139.

Здобувачу належить розробка метода вимірювання параметрів якості неметалевих гетерогенних матеріалів.

6. Голофеева М.А. Изучение зависимости угла раскрытия ультразвукового луча от параметров качества полимерных композиционных материалов / М.А. Голофеева, В.М. Тонконогий // Проблемы техники: научно-виробничий журнал, - Одеса. – 2014. - №1 – С. 177-180.

Здобувачу належить розробка метода вимірювання параметрів якості неметалевих гетерогенних матеріалів.

Наукові праці апробаційного характеру

7. Голофеева М.А. Метод исследования параметров качества изделий из синтеграна // Інформаційні технології в освіті, науці та виробництві: збірник наукових праць. – Одеса: Бахва, 2013, Вип. 4(5) – С. 131-135.

Здобувачу належить розробка математичної моделі, що пов'язує декременту затухання коливань в неметалевих гетерогенних матеріалах із модулем пружності.

8. Голофеева М.А. Метод исследования демпфирующей способности синтеграна / М.А. Голофеева, В.М. Тонконогий // Інформаційні технології в освіті, науці та виробництві: збірник наукових праць. – Одеса: Бахва, 2015, Вип. 3(8) – С. 115-118.

Здобувачу належить розробка математичної моделі, що пов'язує декременту затухання коливань в неметалевих гетерогенних матеріалах із модулем пружності.

9. Голофеева М.А. Акустические методы исследования параметров качества деталей из синтеграна // Оралды ғылым жаршысы (Уральский научный вестник). Серия Технические науки. Физика. Экология. – № 10(58) – Уральск – 2013 – С. 15-18

Здобувачу належить розробка метода вимірювання параметрів якості неметалевих гетерогенних матеріалів.

10. Голофеева М.А. Показатели качества полимерных композиционных материалов и методы их контроля // Оралды ғылым жаршысы (Уральский научный вестник), Серия технические науки. Экология. – Уральск. – № 18(66) – 2013 – С. 23-27

Здобувачу належить аналіз можливості використання того чи іншого метода для контролю параметрів неметалевих гетерогенних матеріалів.

11. Тонконогий В.М. Экспериментальные методы исследования синтеграна / В.М. Тонконогий, М.А. Голофеева, И.А. Усатая // Материалы

XVII семинара «Моделирование в прикладных научных исследованиях» / Под ред. В.П. Малахова и др.: ОНПУ, 2009. – С. 4-5

Здобувачу належить аналіз можливості використання того чи іншого метода для контролю параметрів неметалевих гетерогенних матеріалів.

12. Тонконогий В.М. Контроль качества станочных деталей из синтеграна / В.М. Тонконогий, М.А. Голофеева, А.С. Левинский // Материалы XVII семинара «Моделирование в прикладных научных исследованиях» / Под ред. В.П. Малахова и др.: ОНПУ, 2009. – С. 6-8.

Здобувачу належить аналіз можливості використання того чи іншого метода для контролю параметрів неметалевих гетерогенних матеріалів.

13. Голофеева М.А. К вопросу обеспечения качества синтеграновых изделий // Найновите научни постижения – 2013 // Материали за IX международна научна практична конференция. Том 22: Здание и архитектура, технологии. 17-25 март 2013 година. София: «Бял ГРАД-БГ» ООД, 2013. – С. 59-61.

Здобувачу належить розробка метода вимірювання параметрів якості неметалевих гетерогенних матеріалів.

14. Голофеева М.А. Применение стандартных образцов при акустическом контроле синтеграновых изделий // Materiály IX mezinárodní vědecko - praktická konference «Zprávy vědecké ideje– 2013». - Díl 24. Technické vědy: Praha. Publishing House «Education and Science» s.r.o – P. 60-61.

Здобувачу належить удосконалення метрологічного забезпечення вимірювань властивостей неметалевих гетерогенних матеріалів.

15. Тонконогий В.М. Вычисление неопределенности при ультразвуковом методе контроля качества синтеграновых изделий / В.М. Тонконогий, М.А. Голофеева, В.А. Балан // Materiály IX mezinárodní vědecko - praktická konference «Vědecký průmysl evropského kontinentu– 2013». - Díl 32. Technické vědy.: Praha. Publishing House «Education and Science» s.r.o – P. 52-56.

Здобувачу належить удосконалення методу вимірювання властивостей неметалевих гетерогенних матеріалів.

16. Тонконогий В.М. Акустический метод измерения динамических свойств композиционных материалов / В.М. Тонконогий, М.А. Голофеева // Развитие науки и образования в современном мире: Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции 30 сентября 2014 г. В 7 частях. Часть III. М.: «АР-Консалт», 2014 г. – С. 96-97.

Видання входить до міжнародних наукометричних баз eLIBRARY

Здобувачу належить розробка математичної моделі, що пов'язує дисипативні властивості неметалевих гетерогенних матеріалів із модулем пружності.

АНОТАЦІЯ

Голофєєва М.О. Удосконалення методів та засобів вимірювань дисипативних властивостей неметалевих гетерогенних матеріалів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.01.02 – Стандартизація, сертифікація та метрологічне забезпечення. – Одеський національний політехнічний університет МОНУ, Одеса, 2015.

Дисертація присвячена розробці та впровадженню методу вимірювання дисипативних властивостей матеріалів для підвищення вібростійкості виробів із таких матеріалів.

Встановлений комплекс факторів, що впливають на дисипативні властивості неметалевих гетерогенних матеріалів. Отримані параметри взаємодії акустичних хвиль із неметалевими гетерогенними матеріалами. Розроблений акустичний метод вимірювання дисипативних властивостей неметалевих гетерогенних матеріалів, заснований на вимірюванні швидкості розповсюдження пружних хвиль, які проходять через матеріал, що досліджується. Запропоновано метрологічне забезпечення вимірювання декременту затухання коливань в неметалевих гетерогенних матеріалах, визначені основні метрологічні характеристики розробленого методу. Виконані практичні випробування та впровадження результатів дослідження в умовах машинобудівного виробництва з позитивним ефектом.

Ключові слова: неметалеві гетерогенні матеріали, дисипативні властивості, декремент затухання коливань, метод вимірювання, швидкість розповсюдження пружних хвиль.

ANOTATION

Golofeyeva M.A. The improvement of methods of measuring instruments of the dissipative properties of non-metallic heterogeneous materials. – Manuscript.

The dissertation seeking scientific degree of the candidate of technical sciences in specialty 05.01.02 – Standardization, certification and metrological providing. – Odessa national polytechnic university of MESU, Odessa, 2015.

The dissertation is devoted to improving the vibration resistance of products from non-metallic heterogeneous materials through the development and implementation of the method of measurement of dissipative properties.

The complex of factors, which are affecting on the dissipative properties of non-metallic heterogeneous materials, was established. The parameters of the interaction of acoustic waves with non-metallic heterogeneous materials are obtained. The measurement method of dissipative properties of non-metallic heterogeneous materials, which based on the measuring of the velocity of acoustic waves that pass through the test material, was developed. The system for measuring the dissipative properties of non-metallic heterogeneous materials was developed, the basic metrological characteristics of the system were investigated.

Practical tests and implementation of research results in the condition of engineering production with a positive effect are executed.

Keywords: non-metallic heterogeneous materials, dissipative properties, damping decrement, the method of measuring, the velocity of acoustic waves.

АНОТАЦИЯ

Голофеева М.А. Усовершенствование методов и средств измерений диссипативных свойств неметаллических гетерогенных материалов. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.01.02 – Стандартизация, сертификация и метрологическое обеспечение. – Одесский национальный политехнический университет МОНУ, Одесса, 2015.

Диссертация посвящена разработке и внедрению метода измерения диссипативных свойств неметаллических гетерогенных материалов для повышения виброустойчивости изделий из таких материалов.

Установлен комплекс факторов, влияющих на диссипативные свойства неметаллических гетерогенных материалов. Полученные параметры взаимодействия упругих волн с неметаллическими гетерогенными материалами. Разработанный акустический метод измерения диссипативных свойств неметаллических гетерогенных материалов, основанный на измерении скорости распространения упругих волн, проходящих через исследуемый материал. Предложено метрологическое обеспечение измерения декремента затухания колебаний в неметаллических гетерогенных материалах, определены основные метрологические характеристики разработанного метода. Выполнены практические испытания и внедрение результатов исследования в условиях машиностроительного производства с положительным эффектом.

Научная новизна исследования заключается в разработке и развитии методов измерения диссипативных свойств неметаллических гетерогенных материалов:

- впервые предложен метод измерения диссипативных свойств неметаллических гетерогенных материалов, заключающийся в измерении скорости распространения упругой волны, которая зависит от физико-механических свойств, структуры материалов и параметров вынужденных колебаний, позволяющий определить декремент затухания колебаний в различных направлениях их распространения;

- получил дальнейшее развитие метод измерения скорости упругой волны в неметаллических гетерогенных материалах, распространяющейся после ударной нагрузки, который заключается в измерении разницы во времени сигналов от двух виброакустических датчиков, расположенных на фиксированном расстоянии друг от друга;

- впервые установлена зависимость диссипативных свойств изделий из неметаллических гетерогенных материалов от наличия и характеристик закладных деталей, позволяющая за счет проектных решений, принятых на основе данных измерений, повысить виброустойчивость таких изделий;

- впервые предложена математическая модель, устанавливающая связь между декрементом затухания колебаний в неметаллических гетерогенных материалах и модулем упругости;

- получили дальнейшее развитие математические модели частотной и силовой зависимостей декремента затухания колебаний и модель преобразования акустической волны при ее прохождении через неметаллический гетерогенный материал, состоящее в учете физико-механических свойств гетерогенных материалов.

Ключевые слова: неметаллические гетерогенные материалы, диссипативные свойства, декремент затухания колебаний, метод измерения, скорость распространения упругих волн.