

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

Дисертація  
на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Науковий керівник  
доктор технічних наук, професор,  
ТОНКОНОГИЙ Володимир Михайлович

Одеса – 2015

## ЗМІСТ

	Стор.
ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ	10
1.1 Питання ефективного використання неметалевих гетерогенних матеріалів в машинобудуванні	10
1.2 Неметалеві гетерогенні матеріали як об'єкт контролю	24
1.3 Методи дослідження динамічних властивостей матеріалів	28
1.4 Висновки щодо огляду літератури та постановка задач дослідження	37
ГЛАВА 2 АКУСТИЧНИЙ КОНТРОЛЬ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ НЕМЕТАЛЕВИХ ГЕТЕРОГЕННИХ МАТЕРІАЛІВ	39
2.1 Механічні коливання та хвилі	39
2.2 Розповсюдження пружних хвиль у середовищі	48
2.3 Перетворення акустичної хвилі при проходженні через неметалевий гетерогенний матеріал	55
2.4 Ознаки, що характеризують об'єкт контролю	58
2.5 Апаратура, що використовувалась при дослідженнях	60
2.6 Аналіз похибок акустичних вимірювань	67
2.7 Підвищення точності вимірювання	68
2.8 Висновки	70
РОЗДІЛ 3 ОПИСАННЯ МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ ДИСИПАТИВНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ НЕМЕТАЛЕВИХ ГЕТЕРОГЕННИХ МАТЕРІАЛАХ	73
3.1 Методика визначення декременту затухання коливань в неметалевих гетерогенних матеріалах	73
3.2 Методика вимірювання декременту затухання коливань	78

виробів	
3.3 Методика дослідження залежності декременту затухання коливань в неметалевих гетерогенних матеріалах від механічного навантаження	82
3.4 Методика дослідження частотної залежності декременту затухання коливань в неметалевих гетерогенних матеріалах	85
3.5 Висновки	88
РОЗДІЛ 4 ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ВИКОРИСТАННЯ ЗАПРОПОНОВАНОГО МЕТОДА	90
4.1 Структурна схема та галузь використання запропонованого метода	90
4.2 Дослідження метрологічних характеристик метода вимірювання дисипативних властивостей неметалевих гетерогенних матеріалів	94
4.3 Виробничі випробування та практичні результати досліджень	101
4.4 Висновки	109
ВИСНОВКИ	111
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	114
ДОДАТКИ	131

## ВСТУП

**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 вібростійкості 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 вібростійкості 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.

## РОЗДІЛ 1

### ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ

#### 1.1 Питання ефективного використання неметалевих гетерогенних матеріалів в машинобудуванні

Для забезпечення випереджуючого розвитку машинобудування необхідне інтенсивне використання нових конструкційних матеріалів. Все більше застосування знаходять різного виду гетерогенні матеріали та структури [1], які складаються з двох або більше компонентів (армуючого наповнювача та полімерної матриці) та мають специфічні фізико-механічні властивості, відмінні від сумарних властивостей складових компонентів. Такі матеріали відрізняються високими функціональними можливостями та забезпечують підвищення надійності, збільшення ресурсу роботи, зниження маси виробів, можливість експлуатації в екстремальних умовах. Правильний вибір нових матеріалів для відповідних деталей устаткування у поєднанні з технологічними процесами, цілеспрямованим на отримання необхідної точності та якості, дають можливість суттєво підвищити технічні параметри обладнання, його довговічність зі значним зменшенням матеріалоємності [2].

Різноманіття армуючого наповнювача, матриць, схем армування, що використовуються при створенні неметалевих гетерогенних матеріалів, дає можливість направлено регулювати міцність, жорсткість, рівень робочих температур та інші властивості шляхом підбору складу, змінення співвідношення компонентів та макроструктури композитів.

Одним з таких матеріалів є синтегран (різновид полімербетону) – високонаповнений гетерогенний матеріал на основі епоксидного в'язучого, наповнювачів у вигляді гравію трьох-чотирьох фракцій та мілкодисперсного порошку з високоміцних гранітів.

За основними фізико-механічними та експлуатаційними властивостями цей матеріал аналогічний природному граніту та призначений в основному для

заміни чавунного лиття та блоків натурального граніту, що використовуються при виготовленні деталей спеціальних верстатів, плит вимірювальної техніки, приладів та іншого устаткування, до матеріалів яких ставляться особливі вимоги, наприклад немагнітність, корозійна стійкість, мала теплопровідність.

Виконані із синтеграну деталі мають підвищену порівняно з чавуном вібростійкість, розмірну стабільність, в результаті чого збільшується точність виготовлених на таких верстатах деталей, підвищується стійкість різального інструменту, що використовується (особливо, керамічного) [3]. До його переваг також можна віднести: високу теплову стабільність та нечутливість до короткочасного перепаду температур; високу стійкість до агресивного середовища; малу усадку, що дозволяє виготовляти деталі без подальшої механічної обробки; високий коефіцієнт використання матеріалу (практично дорівнює 1); простота і невеликі габарити устаткування та висока продуктивність при малих енергозатратах; можливість повної автоматизації технологічного процесу виготовлення.

Порівняно з натуральним гранітом цей матеріал має технологічні переваги, пов'язані в першу чергу із зниженням трудомісткості виготовлення деталей та економією алмазного інструменту при механічній обробці. Крім того, із синтеграну можуть бути виготовлені деталі, які з натурального граніту отримати неможливо [3].

Склади синтеграну поділяються на такі групи: наджорсткі, жорсткі, нормальні, пластичні та над пластичні. Це розділення умовне та визначається, в першу чергу, складом полімерної матриці. Наджорсткі та жорсткі склади потребують спеціальних методів переробки та можуть містити до 6 % в'язучого. Інші склади перероблюються традиційними для полімербетонів методами та можуть містити (7-25) % в'язучого. Для виготовлення основної маси машинобудівних деталей рекомендують використовувати синтегран, що містить до 11 % в'язучого [4].

Загальний склад синтеграну наведений в таблиці 1.1.

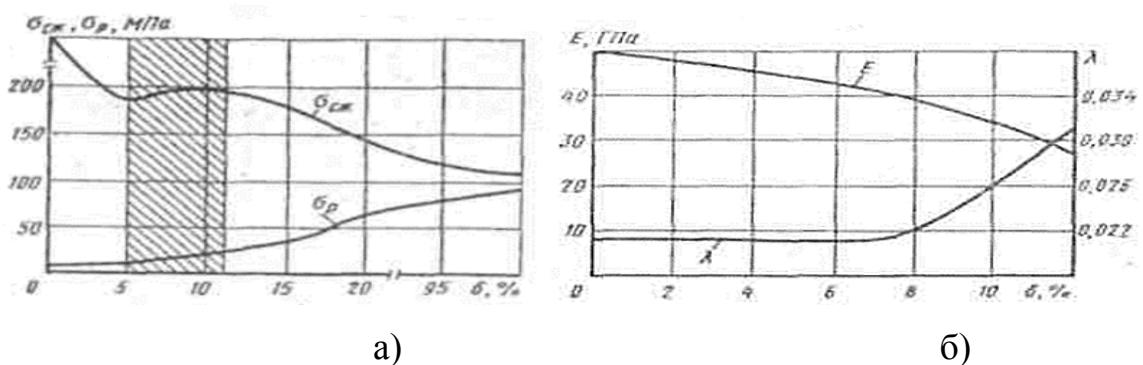
Таблиця 1.1 – Загальний склад синтеграну

Основні складові синтегранів	Масова доля, %	Розмір фракцій, мм
Мінеральний наповнювач	75 – 83	0,63 - 20,0
Мінеральний заповнювач	10 – 15	< 0,315
Полімерне матриця	7 – 11	

Полімерне в'язуче є багатокомпонентною системою, що містить смоляну частину та затверджувач. Від складу в'язучого, а також від правильного співвідношення в'язучого, наповнювача та заповнювача залежать фізико-механічні властивості синтегранів.

В якості полімерної матриці для синтегранів використовують епоксидні композиції «холодного» затвердіння (без підведення тепла зовні). До їх складу входять смоли, активні розчинники та спеціальні добавки. Розчинники дозволяють суттєво знизити в'язкість смоли, а також регулювати час та екзотермію реакції [5].

При великій кількості полімерної матриці суттєво знижується модуль пружності, теплостійкість, збільшується повзучість та схильність до викривлення деталей [5]. На рисунку 1.1 представлені залежності властивостей синтеграну від вмісту полімерного в'язучого  $\delta$ .



$\sigma_{ст}$  – міцність при стисканні;  $\sigma_p$  – міцність при розтягненні;  $E$  – динамічний модуль пружності;  $\lambda$  – декремент затухання коливань (заштрихована зона відповідає рекомендованому вмісту в'язучого)

Рисунок 1.1 – Залежність властивостей синтеграну від вмісту в'язучого

В таблиці 1.2 приведені основні фізико-механічні характеристики синтеграну, що містить (7-11) % в'язучого порівняно з характеристиками чавуна та граніту.

Таблиця 1.2 – Фізико-механічні характеристики синтеграну, чавуна та граніту

Параметр	Одиниці вимірювання	синтегран	чавун	Граніт
Міцність при стисканні	МПа	180-200	400-900	-
Міцність при згинанні	МПа	32-36	160-400	3,5-5
Модуль пружності при згинанні	МПа·10 <sup>4</sup>	4,5-5,5	10-12	1,5-2,5
Густина	г·см <sup>-3</sup>	2,4-2,7	7-7,5	2,6-3
Коефіцієнт Пуассона	-	0,25-0,4	0,26	-

В таблиці 1.3 наведені галузь використання, типи деталей та техніко-економічні переваги використання синтеграну [5].

Таблиця 1.3 – Використання синтегранів в машинобудуванні

Галузь використання	Типові деталі	Переваги використання
Базові деталі верстатів	Станини, стійки, підстави, рами, тумби, траверси, колони	Підвищення вібростійкості та точності, зниження рівня шуму, економія металу і електроенергії, поліпшення умов праці та екології

Продовження таблиці 1.3

Галузь використання	Типові деталі	Переваги використання
Корпусні деталі	Шпindelьні бабки, корпуси редукторів, столи, супорти	Теж саме; зниження трудомісткості виготовлення
Деталі вимірювальної та спеціальної техніки	Вимірювальні плити, кутники, підставки, аеростатичні напрямні	Заміна природного граніту, зниження трудомісткості, економія алмазного інструменту, можливість створення принципово нових конструкцій
Деталі, що працюють в агресивному середовищі	Ванни, деталі електрохімічних верстатів, базові деталі спеціальних машин	Економія корозійностійких сталей, скорочення трудомісткості виготовлення, зниження рівня шуму
Штампове устаткування	Пуансони, матриці для згинання та витяжки великогабаритних деталей	Різде зниження трудомісткості виготовлення
Державки різального інструменту	Токарні різці, борштанги, фрези	Підвищення стійкості інструменту, точності обробки та якості поверхні деталей

При виготовленні станин верстатів із синтеграну технології та властивості матеріалу дозволяють формувати різноманітні види конструкцій. На рисунку 1.2 приведені типи станин верстатів із синтеграну.



Рисунок 1.2 – Типи станин верстатів із синтеграну

Використання синтеграну в якості матеріалу для виготовлення машинобудівних деталей дозволяє вирішити широке коло техніко-економічних питань, серед яких спрощення технологічного процесу та зменшення часу виготовлення деталей, можливість виконання нових конструкцій.

Роботи із синтеграну в нашій державі почалися в 1983 році в Експериментальному науково-дослідному інституті металорізальних верстатів. Перший круглошліфувальний верстат мод. ЗУ10А зі станиною із синтеграну був виготовлений в 1984 році. Використання синтеграну, дозволило підвищити вібростійкість, в результаті чого вдалося знизити шорсткість поверхні деталей, які оброблювалися на верстаті. Базові деталі верстатів розраховуються на жорсткість, тому до їх міцності не ставляться високі вимоги. В цих випадках придатний синтегран, який забезпечує необхідну статичну та динамічну жорсткість при достатній технологічній міцності [4].

В балансувальних верстатах до резонансного типу моделі МА97Д18РП (ЭНИМС та завод «Станкоконструкція») використання виробів із синтеграну дозволило зменшити вплив зовнішніх коливань, забезпечити стійку роботу верстатів та підвищити їх точність на один клас [6]. Аналогічні результати були отримані при порівняльних випробуваннях обробно-розточувальних верстатів

моделі 2754 В (Одеський завод прецизійних верстатів) зі станинами із синтеграну та чавуну.

Першу серію досліджень проводили на верстаті зі станиною з чавуну СЧ20, потім її замінили на станину із синтеграну. Напрямні та опорні поверхні під мости були виконані з чавуну СЧ20 у вигляді закладних деталей, прикріплені до стінок форми та залиті синтеграном. Аналогічно в станині закліплювалися вставки із сталі для монтажу навісних елементів верстата. Ливарна форма була виготовлена з деревини, заливку та ущільнення виконували на вібростенді при кімнатній температурі. Напрямні та приєднувальні поверхні станини із синтеграну остаточно оброблювалися за такою ж технологією, що і аналогічні із чавуну [7]. При обробці деталей з чавуна на обробно-розточувальному верстаті середніх розмірів подовженими борштангами зі швидкістю різання біля 600 м/хв станина із синтеграну порівняно зі станиною з чавуну при інших рівних умовах дозволяє підвищити точність за основним параметром – округлість отворів в 1,5-2 рази.

В роботі [8] в якості об'єкта дослідження був обраний важкий вертикально-фрезерний верстат моделі 65Б90ПМФ4. Базові деталі його несучої системи частково або повністю були виконані з синтеграну. Аналіз отриманих результатів показав, що порівняно з базовим варіантом у верстата зі стійкою із синтеграну знизилися власні частоти (перша – з 25 Гц до 21 Гц, друга – з 62 Гц до 50 Гц), а також зменшилася динамічна піддатливість на власних частотах (на першій резонансній частоті в 1,3 рази, на другій – в 2,5 рази). До того ж, необхідно відмітити зниження максимального від'ємного значення дійсної частини АФЧХ більше ніж в 2 рази, що свідчить про значне підвищення вібростійкості.

В Україні на ХК Мікрон виготовляють універсальні фрезерні верстати ОММ, базові деталі яких виконані з синтетичного граніту. Зовнішній вигляд основи такого верстата після виймання з форми представлена на рисунку 1.3





Рисунок 1.3 – Основа універсального фрезерного верстата ОММ із синтеграну після виймання з форми фірми ХК Мікрон

На рисунку 1.4 приведений фрагмент станини із синтеграну із чавунними закладними, яка виготовляється на ХК Мікрон



Рисунок 1.4 – Фрагмент станини із синтеграну з чавунними закладними

В Матеріалах фірми [9] відмічається, що використання синтеграну в якості матеріалу станини забезпечило:

- підвищення демпфування в 6-8 разів порівняно з чавуном;
- міцність конструкції та оптимальну жорсткість;
- ідеальний розподіл моментів інерції;
- високу температурну стабільність;
- геометричну стабільність;
- хімічну інертність по відношенню до агресивного середовища;
- екологічність.

На рисунку 1.5 зображена колонна із синтеграну фрезерного верстата ОММ.

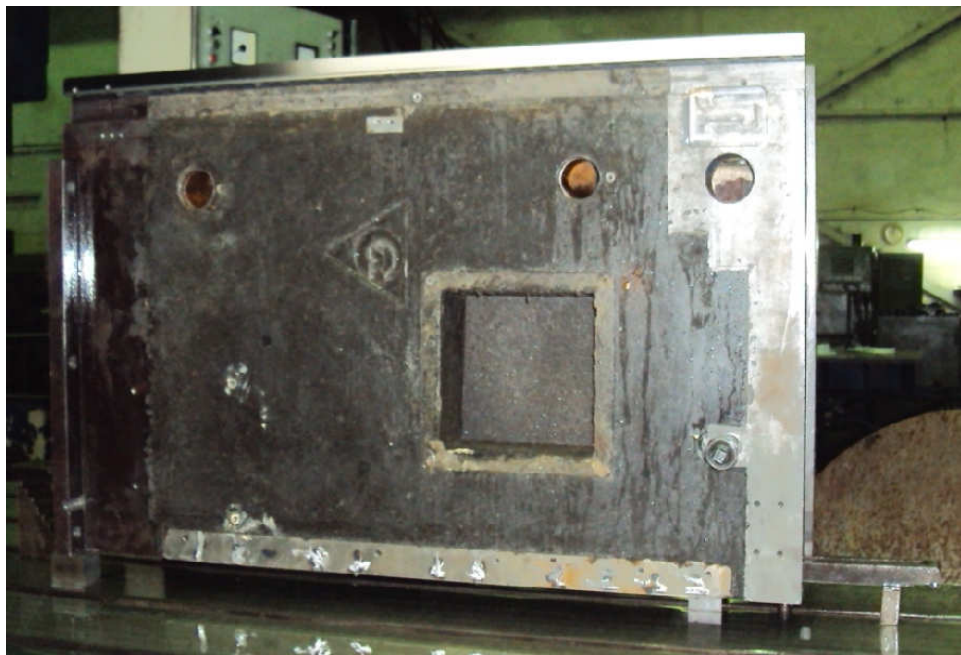


Рисунок 1.5 – Колонна із синтеграну фрезерного верстата виробництва ХК Мікрон

Використання синтеграну на Липецькому верстатному заводі ОАО «ЭНИМС» (Російська Федерація) дало значний ефект у верстатах шліфувальної групи. Економічна ефективність виробництва синтеграну порівняно з чавунним литтям характеризується наступним [10]:

- економія енергетичних ресурсів в 2-3 рази;

- зниження загальних витрат основного та допоміжних матеріалів в 1,2-1,4 рази;
- зниження виробничих площ в 3-4 рази;
- зниження виділення газів в 6,5 рази;
- зниження пилу в 10 разів.

В закордонних літературних джерелах відмічається тенденція використання неметалів у виробництві станин верстатів. Навіть неметалеві гетерогенні матеріали довгий час застосовуються за межами нашої держави для виготовлення базових деталей верстатів [11, 12]. Фірма «Pneumo prestige» (США) спеціалізується на випуску особливо точних верстатів для алмазної обробки. Перший верстат цього ряду мав гранітну станину, поставлену на зварну плиту через гумові віброгасники у вигляді надутих повітрям опор, що забезпечували власну частоту верстата 3 Гц. Аеростатичні напрямні супорта мали більш високу жорсткість [7].

В Німеччині випускається верстат з основою, виконаною з натурального граніту, для обробки печатних плат. Основа верстата складається зі стола, що встановлений та зафіксований за допомогою клею на двох гранітних тумбах. Стійки та напрямні також виконані з граніту [13]. Це забезпечує високу точність розташування отворів при максимальній продуктивності.

При виробництві високоточного обладнання в таких державах, як Німеччина, США, Японія, Франція, Швейцарія, Англія цілеспрямовано використовуються матеріали, аналогічні синтеграну. Такі фірми, як «Toyota machine tools», «Nippon electric» (Японія), «Schuder», «Posalux» (Швейцарія), «Cincinnati Milacron», «Manon» (США), «EMAG», «Elb-Schliff», «SKF» (Німеччина) серійно випускають верстати, вимірювальні комплекси, устаткування з елементами, виконаними з неметалевих гетерогенних матеріалів [14].

Фірмою Hamburg (Нідерланди) виготовлений прецизійний токарний верстат моделі Super – Mikrotorn з дискретністю подачі 0,1 мм та радіальним биттям шпинделя менше ніж 0,1 мкм. Гідростатичні напрямні супорта

гарантують стабільність позиціонування до 0,2 мкм. Станина виконана з граніту. Вібραції при роботі відсутні, що дозволяє оброблювати загартовані деталі з точністю не менше ніж при шліфуванні, при скороченні часу обробки до 80 % [15]. Тим не менш, гранітні деталі достатньо дорогі та чутливі до мікротріщин. Крім того, з граніту доцільно виготовлювати деталі тільки простої форми [6].

Фірма BRAMAC, Цинцинаті, США виготовлює верстат зі станиною з литого полімеру. При зменшенні вібрації на 30 % зменшується зношення зубчастих коліс приводу [16, 17].

Фірма GARDING випускає протягом багатьох років токарні верстати з числовим програмним управлінням на основі полімербетону. Це дозволяє на 30 % підвищити стійкість інструменту, на 37 % покращити якість поверхні та на 33 % знизити вібрації в шпинделі порівняно з основою з чавуну.

Відповідно до матеріалів фірми Studer, станини, вироблені з синтеграну мають в 5-8 разів більш високе демпфування порівняно з такими ж з сірого чавуну. Дослідження показують, що власні резонанси на частотах менше 100 Гц повністю усунені, а резонансні коливання на частоті 170 Гц різко зменшені. Синтегран має менші власні частоти, більш низькі амплітуди, дозволяє підвищити жорсткість та 2-6 разів динамічні характеристики розсіювання енергії коливань.

Фірма Voehringer (Німеччина) випускає верстати серії NG та гнучкі токарні центри серії NV, станина яких виготовлена з полімербетону. Це разом з високоякісними лінійними ролюковими напрямними забезпечує постійність точносних характеристик протягом багатьох років при обробці найрізноманітніших деталей [17].

Відома група EMAG (Німеччина), основу виробничих установок серії VLC якої складає стабільна станина з високоякісного синтетичного граніту MINERALIT. Така компоновка гарантує найвищу точність, якість поверхні та більш високу стійкість інструмента при обробці патронних деталей [18].

В електрохімічних та електроерозійних верстатах синтегран може бути використаний в якості матеріалу для виготовлення плит та столів, оскільки він стійкий до робочих рідин, що використовуються в таких технологіях. До того ж, він неелектропровідний, а деталі, виготовлені з нього не мають мікротріщин (на відміну від деталей з природного граніту) [4].

Компанія PRIMA POWER використовує синтетичний граніт для виготовлення рам в установках лазерного різання, що забезпечує найвищу термостабільність та максимальне віброгасіння [19].

Ще один напрямок використання синтеграну в машинобудуванні – технологічна оснастка та різальний інструмент [20]. Порівняльний аналіз токарних прохідних різців з державками з синтеграну та сталі показали, що завдяки високій демпфуючій спроможності різці з державками із синтеграну мають стійкість на (25...30) % вище та дозволяють при однакових режимах різання знизити шорсткість обробленої поверхні в 1,5-1,7 разів [4]. Причиною цього є те, що значення модуля пружності та щільності у синтеграну менше порівняно зі сталлю. Зменшення першої резонансної частоти власних коливань дає спроможність виключити вібрації при використанні більш вигідних режимів різання [21].

Корпусні деталі з неметалевих гетерогенних матеріалів широко використовуються у вимірювальних комплексах. За останні 20 років провідною з виготовлення координатно-вимірювального обладнання є англійська фірма «LK tool Company». Ця фірма стала першою використовувати для свого устаткування граніт з підвищеною міцністю та стабільністю характеристик – матеріал, що використовується тепер всіма виробниками такого обладнання.

На рисунку 1.6 представлений вимірювальний центр фірми Mauzer (Німеччина), у якого основа, стійки та траверси виконані з неметалевого гетерогенного матеріалу [22].



Рисунок 1.6 – Координатно-вимірювальний центр KMZ – W 20-12-10

Високошвидкісне вимірювання та контроль у виробництві досягається за рахунок жорсткої відкритої структури базових деталей обладнання, що гасить власні вібрації на частоті, близькій до 24 Гц. Такі системи захищені від забруднень, вібрацій, пов'язаних з умовами навколишнього середовища у промислових цехах та забезпечують точність вимірювання порядку 0,5 мкм [20].

На рисунку 1.7 наведені вимірювальні установки з основами із синтеграну фірми Hommelwerke GmbH (Німеччина) [24].

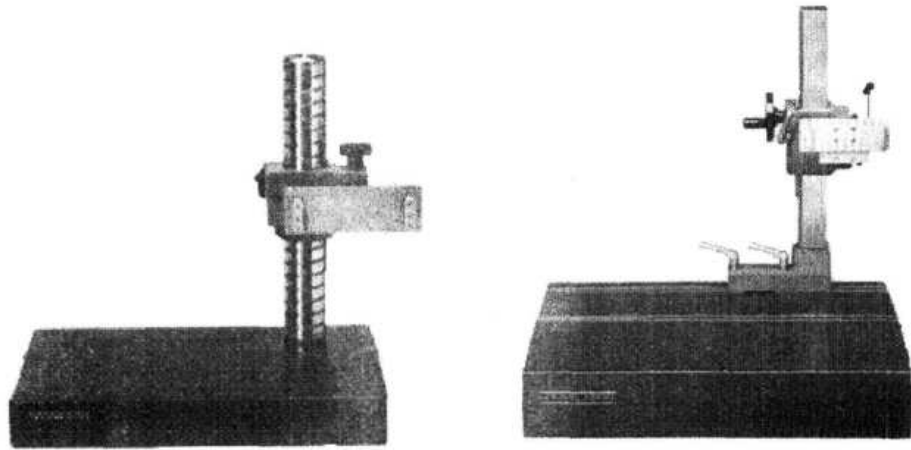


Рисунок 1.7 – Вимірювальні установки з плитою із синтеграна

Досвід використання синтеграну показує, що галузь його застосування доволі широка та не обмежується тільки машинобудуванням. В таблиці 1.4 представлені галузі, де можливе використання синтегранів.

Таблиця 1.4 – Галузі використання синтеграну

Галузь використання синтеграну	Найменування виробів
Різальний інструмент	Різці, фрези, шевери, напилки, пили,
Вимірювальний інструмент	Штанги штангенциркулів, повірочні плити, динамометри
Верстати та устаткування	Станини, стійки, підставки, траверси, столи, корпуси редукторів, коробок швидкостей і подач
Будівництво	Облицювальні матеріали, шпали метро, елементи будівельних конструкцій, кришки каналізаційних люків, стовпи вуличного освітлення
Військова справа	Бронежилети, броня танків, глушники, фюзеляжі літаків, стабілізатори ракет

Галузь використання синтеграну	Найменування виробів
Предмети народного споживання	Декоративні вироби, більярдні столи, акустичні колонки, сантехнічні вироби
Засоби екологічного захисту	Контейнери для захоронення радіоактивних відходів, саркофаги, контейнери для радіоактивних речовин

Таким чином, можна констатувати перспективність використання неметалевих гетерогенних матеріалів в різноманітних галузях народного господарства. В першу чергу це пов'язано з підвищеним віброгасінням порівняно з традиційними матеріалами. Враховуючи складність форми деталей, наявності великої кількості закладних металевих деталей та низької текучості епоксидно-гранітної суміші в процесі лиття можливе виникнення різноманітних дефектів: повітряних раковин, нерівномірного розподілу фракцій гранітної крихти та епоксидного в'язучого об'ємом відливки, відшарування закладних деталей [25]. Розширення галузі використання та покращення фізико-механічних властивостей неметалевих гетерогенних матеріалів неможливо без створення нових та удосконалення існуючих методів та засобів контролю якості виробів з нього [26].

## 1.2 Неметалеві гетерогенні матеріали як об'єкт контролю

Поряд з високими експлуатаційними характеристиками неметалевих гетерогенних матеріалів необхідно відмітити їх деякі недоліки. В тому числі, мінливість фізико-механічних властивостей, наявність різноманітних дефектів (повітряні раковини, нерівномірність розподілу фракцій об'ємом відливки,



відшарування закладних деталей), неоднорідність складу та структури. Питання якості та надійності матеріалів, виробів та конструкцій з них є однією з найбільш актуальних проблем сучасного науково-технічного розвитку. Особливе значення в рішенні такої проблеми мають ефективні методи та засоби контролю [3].

Неметалеві гетерогенні матеріали є доволі складними об'єктами для контролю, оскільки характеризуються анізотропією властивостей, великою різноманітністю типів структур, специфічними фізичними властивостями (електро-, тепло, звукоізоляційними) [27].

Показниками якості таких матеріалів є: міцність, дисипативні властивості, гранулометричний склад, сипучість, наявність вологи та летючих речовин, об'ємні характеристики, температурні характеристики, теплостійкість, усадка, текучість, пластометричні характеристики (коефіцієнт в'язкості, тривалість пластично-в'язкого стану, час затвердіння) [28].

Характеристики гетерогенних матеріалів мають стохастичну природу. При переробці складових матеріалів у виробках неминуче виникають різноманітні дефекти, що обумовлені випадковим змінням складу компонентів, порушенням допусків на конструктивні та технологічні параметри, відмовами устаткування та т.п..

Найбільш ефективними методами контролю якості, що використовуються як на стадії виготовлення, так і на стадії експлуатації виробів, є неруйнівні методи контролю. В той же час вони є опосередкованими методами контролю, тобто не дозволяють проводити прямий відлік таких параметрів, як щільність, структура [28]. Для визначення цих параметрів неруйнівними методами необхідне калібрування за допомогою руйнівних та аналітичних методів.

Точність та чутливість неруйнівних методів контролю визначається точністю та чутливістю методів, за допомогою яких проводиться калібрування, а також оптимальністю обраного еталону. Тому однією з найважливіших задач неруйнівних методів контролю є аналіз фізичних основ взаємодії випромінювання, що використовується (ультразвукові хвилі, радіохвилі,

радіація, електричні поля та ін.) з контрольованим середовищем та розробка методики контролю конкретних параметрів технологічних процесів та готових виробів при їх виготовленні та експлуатації.

На основі аналізу літературних джерел [26 – 84] був сформований комплекс параметрів відливок із неметалевих гетерогенних матеріалів, які підлягають контролю, та визначені методи їх контролю.

На рисунку 1.8 приведений комплекс параметрів відливок із неметалевих гетерогенних матеріалів, які необхідно контролювати для забезпечення високої якості та надійності виробів.

Задачі неруйнівного контролю можна розділити на дві групи: вимірювання структурних та фізико-механічних параметрів матеріалу виробу (ступінь полімеризації, щільність, товщина стінки та ін.); діагностика показників несучої спроможності виробу або конструкції (наприклад, максимально допустимої міцності, деформативності, накопичення пошкоджуваності та ін.). Рішення задач другої групи зводиться до контролю за узагальненим параметром, який характеризує придатність об'єкта своєму призначенню, що вимагає використання комплексу методів неруйнівного контролю [26].

При аналізі можливості використання того чи іншого методу контролю параметрів відливок із неметалевих гетерогенних матеріалів враховувалися стан контрольованого середовища (відносяться до діелектриків), його структура та спроможність взаємодіяти з використаним випромінюванням, розміри, конфігурація та конструктивні особливості об'єкта контролю, а також вид задачі, що вирішується (дефектоскопія, дослідження дисипативних властивостей, діагностика жорсткості, міцності та т.п.).

Як зазначалося раніше, основною перевагою неметалевих гетерогенних матеріалів над традиційними матеріалами є підвищена вібростійкість. Ефективне використання таких матеріалів та конструкцій з них потребує визначення достовірних значень характеристик демпфування, а також закономірності їх змінення в процесі навантаження.

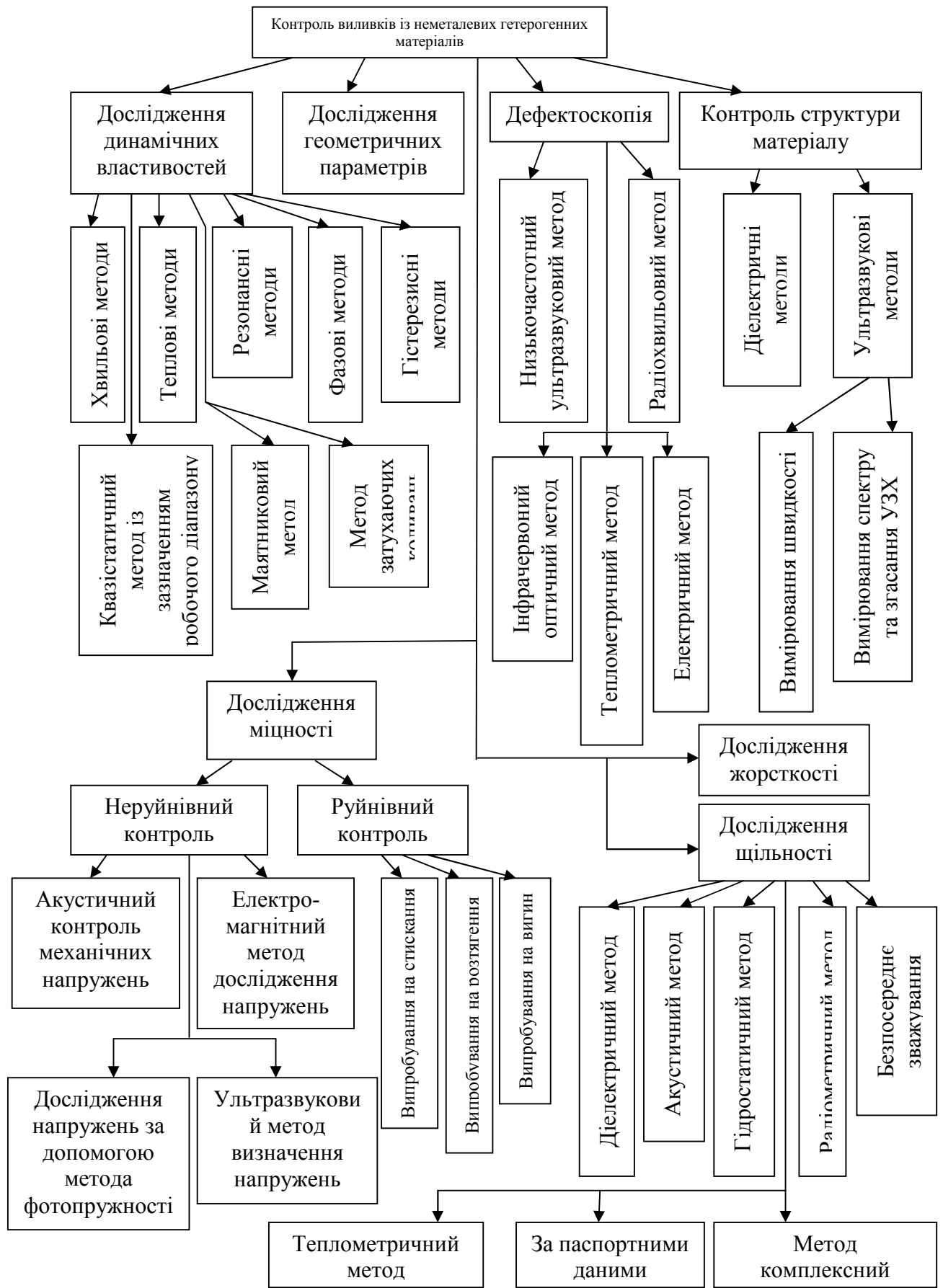


Рисунок 1.8 – Методи контролю параметрів виливків із неметалевих гетерогенних матеріалів

### 1.3 Методи дослідження дисипативних властивостей матеріалів

Дисипативні властивості матеріалів та елементів конструкцій, що виготовлені з них, є самоїєю характеристикою, яка визначається незворотними втратами енергії коливань з урахуванням впливу та взаємозв'язку конструктивних, технологічних та експлуатаційних факторів.

Різноманітні механізми та відповідні моделі для визначення дисипативних властивостей традиційних матеріалів викладені в роботах Г.С. Писаренка, Н.Н. Афанасьєва, А.Ю. Ішлинського, В.Л. Бідермана, В.В. Матвєєва, В.Т. Троценка та ін. Розвитку методів дослідження демпфування в гетерогенних матеріалах присвячені монографії Б.Л. Пелеха, Б.І. Саляка, В.В. Болотіна, В.В. Васильєва, Ю.Н. Новичкова, А.П. Яковлева, А.Н. Гузя, В.П. Тамужа та ін..

Величина та характер демпфування обумовлені різноманітними механізмами дисипації енергії, які характерні для матеріалу, що досліджується при конкретних умовах навантаження [1]. В елементах конструкцій поглинання енергії також відбувається при взаємному переміщенні елементів конструкції. Тому для характеристик розсіювання енергії коливань в матеріалах та конструктивних з'єднань використовуються терміни «внутрішнє» та «конструктивне» демпфування або тертя [86 - 93]. На внутрішнє розсіювання механічної енергії впливають такі характеристики структури, як внутрішня напруга, домішки, величина зерен, легуючі елементи, холодна деформація, фазові перетворення та процеси кристалізації [94].

Існує декілька видів демпфування. Розглянемо їх особливості.

В'язке демпфування характерне для механічних систем, що коливаються в текучому середовищі, такому як повітря, газ, вода або масло. Опір руху тіла з боку оточуючого середовища призводить до розсіювання енергії, величина якого залежить від таких факторів, як розміри, форма та швидкість тіла, що коливається, в'язкість середовища, частота коливання. При такому виді

дисипації енергії коливань сила опору середовища пропорційна швидкості тіла, що коливається.

В'язке демпфування можна використовувати при будь-якій формі збудження. Найбільш загальна форма в'язкого демпфування є релеєвське демпфування.

Кулонівське або фрикційне демпфування має місце при ковзанні двох сухих поверхонь. Демпфуюча сила дорівнює додатку нормального зусилля та коефіцієнта тертя, не залежить від швидкості лише на початку руху та за знаком завжди протилежна швидкості.

Гістерезисне демпфування. Коли матеріал деформується, енергія поглинається та розсіюється всередині самого матеріалу. Цей ефект обумовлений тертям між внутрішніми шарами, які «течуть» або ковзають при деформуванні. Коли конструкція з демпфуванням в матеріалі коливається, на діаграмі «напруга-деформація» з'являється петля гістерезису. Тому демпфування в матеріалі називають також гістерезисним. Площа петлі гістерезису виражає потенційну втрату енергії в одиниці об'єму матеріалу за один цикл коливань внаслідок розсіювання механічної енергії.

Залежність характеристик демпфування від параметрів коливань визначається діючими в матеріалі або елементі конструкції механізмами розсіювання енергії. Тому вибір експериментального метода визначення характеристик дисипації енергії коливань повинен базуватися на моделі, що передбачає дію реально існуючих механізмів розсіювання енергії, які характерні для досліджуваного матеріалу.

Розсіювання енергії в матеріалі сильно залежить від його структури, температури, характеру напруженого стану, розмірів та форми зразків. Треба зазначити розходження довідникових даних щодо характеристик демпфування для одних і тих самих матеріалів. Це свідчить в першу чергу про недосконалість методів дослідження розсіювання енергії, що не враховують зазначених особливостей.

Для більшості традиційних конструкційних матеріалів результати багатьох експериментів свідчать про незалежність характеристик розсіювання енергії коливань від частоти [1, 95]. Стосовно впливу частоти на дисипативні властивості неоднорідних матеріалів думки дослідників різняться. Це може бути обумовлено впливом внутрішньої структури, умовами навантаження матеріалу, а також можливостями використовуваних методів дослідження [96].

Неметалеві гетерогенні матеріали характеризуються складними процесами розсіювання енергії за рахунок таких факторів [1]:

- внутрішнє демпфування у в'язкій матриці та жорсткому наповнювачі;
- конструкційне розсіювання на границях розподілу матриця – наповнювач.

За рахунок адгезійних зв'язків компонентів перехідні зони в областях контакту наповнювача та матриці, що характеризуються різною жорсткістю, обумовлюють значно вищий рівень демпфування порівняно з сумарним розсіюванням в матриці та наповнювачі [97-100]. В деяких випадках перехідні зони мають особливу фізичну природу, причому при їх утворенні відбувається різке одночасне підвищення міцності та дисипативних властивостей [101-103].

Інтерес представляють явища розсіювання енергії в неметалевих гетерогенних матеріалах при взаємодії складових компонентів. Дослідження дисипативних властивостей композита за правилом суміші не забезпечує достатньої точності та не пояснює діючих механізмів дисипації. Така оцінка справедлива при відносно низьких, як для композита, рівнях демпфування та базується на припущеннях ідеального контакту матриця – наповнювач [1].

На рисунку 1.9 наведені фактори, що впливають на характеристики розсіювання енергії в неметалевих гетерогенних матеріалах.

Особливості внутрішнього розсіювання енергії в неметалевих гетерогенних матеріалах пов'язані, в першу чергу, з тим, що процеси в'язкого демпфування в полімерній матриці та контактних шарах на відміну від металів, де вони мають другорядне значення, характеризуються кількісними параметрами, більшими на декілька порядків [104-107]. В свою чергу значну

частину розсіювання енергії в композитах обумовлюють також ефекти конструкційної дисипації [1, 108-110].



Рисунок 1.9 – Фактори, що впливають на характеристики розсіювання енергії в неметалевих гетерогенних матеріалах.

Для неметалевих гетерогенних матеріалів характерна залежність дисипативних властивостей від таких параметрів коливань, як амплітуда та частота. При дослідженні однорідних полімерних матеріалів спостерігалось зменшення декременту затухання згинальних та крутильних коливань з ростом частоти [111-115]. В роботі [115] також наведені характеристики розсіювання енергії в різноманітних склопластиках та оргсклі, що зростають з ростом частоти (модель Фойгта). Для зразків з пінопласту отримана нелінійна залежність декременту затухання коливань від частоти. Нелінійні частотні залежності характерні також і для гетерогенних матеріалів [116-118], причому положення максимумів розсіювання енергії обумовлено структурою матеріалу, об'ємним співвідношенням та взаємодією компонентів.

Експериментальні методи визначення характеристик розсіювання енергії діляться на прямі та опосередковані [119, 120]. Прямі методи базуються на безпосередньому отриманні абсолютної величини розсіювання енергії при

циклічному деформуванні. Вони не отримали широкого розповсюдження через складність їх технічної реалізації та недостатньою точністю величин [1, 121]. В наш час широко використовуються опосередковані методи визначення дисипативних властивостей матеріалів, оскільки отримані з їх допомогою відносні характеристики демпфування зручні для інженерного оцінювання поведінки елементів конструкцій в широкому діапазоні частот та амплітуд навантаження [122-125].

Методи дослідження дисипативних характеристик матеріалів класифікуються за частотою та характером коливань в залежності від виду зовнішнього проявлення параметру демпфування, що вимірюється [124]. Деякі методи не дозволяють одночасно визначати динамічні та деформаційні властивості матеріалів [123]. Тому використовуються також класифікація методів за можливостями використовуваних технічних засобів та за способом збудження коливань [9].

В роботі [122] приводиться класифікація методів дослідження дисипативних характеристик матеріалів за частотним діапазоном : інфразвукові ( $10^{-4} \dots 10$ ) Гц, звукові ( $10 \dots 10^4$ ) Гц, ультразвукові ( $10^4 \dots 10^8$ ) Гц та гіперзвукові ( $10^9 \dots 10^{11}$ ) Гц.

В класифікації, наведеній в роботі [125], методи дослідження пружних та дисипативних характеристик поділені на хвилеві, теплові, резонансні, затухаючих коливань, фазові, гістерезисні, маятникові та квазістатичні із зазначенням робочого діапазону частот.

Переважає більшість експериментальних методів визначення характеристик демпфування розроблена для систем, в яких передбачено незалежність дисипативних властивостей від частоти при існуванні їхньої ступеневої залежності від амплітуди. Найбільше розповсюдження отримали методи резонансного піку, динамічної петлі гістерезису, вільних коливань [126-129]. При дослідженні характеристик розсіювання енергії в гетерогенних матеріалах використовуються також фазові методи (рис. 1.10).





Рисунок 1.10 – Методи дослідження дисипативних властивостей матеріалів.

Теоретичні передумови, на яких базуються ці методи дослідження властивостей пружних систем, підтверджуються великою кількістю емпіричних даних [75, 78, 130-132]. Основним інформативним параметром у таких методах визначення демпфування є резонансна частота або частота власних коливань

[1]. При цьому, можна відмітити відсутність можливості досліджувати частотні залежності цих дисипативних характеристик.

Можливість відомих експериментальних методів із виявлення залежності демпфування від частоти обмежені. До того ж, більшість таких методів оснований на спрощених моделях процесів дисипації енергії, що дозволяє їх використання лише для однорідних структур або конкретних типів матеріалів [1].

Зміна розмірів зразків при визначенні частотної залежності розсіювання енергії в матеріалі неадекватна умовам, в яких реально експлуатується елемент конструкції, та не дозволяє досліджувати розсіювання енергії коливань на частотах, що відмінні від резонансних. Ще одним недоліком резонансних методів є похибка визначення частоти, яка відповідає максимальній амплітуді при мінімальному значенні збуджуючої сили [1].

Таких недоліків позбавлені фазові методи дослідження характеристик розсіювання механічної енергії, що пов'язують коефіцієнт демпфування з комплексом фазових характеристик, які володіють великою інформативністю щодо характерних особливостей руху механічних систем під дією гармонічного збудження. Метод базується на моделях нелінійних механічних систем, що передбачають найбільш загальний характер дисипативних сил [1]. При цьому залежність характеристик розсіювання енергії (декременту затухання коливань та коефіцієнта затухання) від параметрів коливань визначається на основі отриманих співвідношень за експериментальними даними для конкретного матеріалу. Характеристики дисипації енергії розраховуються за отриманими амплітудними та фазовими характеристиками.

Недоліком розглянутого методу є неможливість врахування реально існуючих при експлуатації елемента конструкції механічних напружень, які значною мірою визначають розсіювання енергії в матеріалі.

Таким чином при дослідженні дисипативних властивостей неметалевих гетерогенних матеріалів, для яких характерні складні процеси розсіювання енергії, використання відомих експериментальних методів призводить до

значних похибок та не дає можливості визначити вплив кожного з окремо діючих механізмів дисипації енергії. У зв'язку з цим невіршеним залишається завдання визначення особливостей динамічної поведінки неметалевих гетерогенних матеріалів та елементів конструкцій з них в залежності від особливостей експлуатації, а саме: амплітуди та частоти коливань, характеристик напруженого стану матеріалу, температурних режимів використання матеріалу, структури та анізотропії його властивостей, а також розмірів та форми досліджуваних зразків. Необхідно відмітити, що на характеристики розсіювання енергії в конструкціях з неметалевих гетерогенних матеріалів значною мірою впливають закладні деталі. Серед характеристик закладних деталей, які здійснюють вплив на дисипативні властивості конструкції можна виділити:

- характеристики геометрії;
- матеріал;
- відстань між закладними деталями;
- способи закладення;
- навантаження, що прикладені до закладних деталей.

Тому необхідно розробити метод вимірювання дисипативних властивостей неметалевих гетерогенних матеріалів, який би дозволяв врахувати зазначені вище особливості експлуатації.

Відомо, що структурна анізотропія матеріалу, геометрія об'єкту та стан обмежуючих поверхонь, зовнішній вплив (тепловий та електромагнітний), деформація об'єкта контролю впливають на швидкість розповсюдження акустичних хвиль в матеріалі. Швидкість звука в середовищі залежить також від напружень, характеру поляризаційної хвилі та взаємної орієнтації хвильового вектору та напрямку зусилля [133]. В роботі [134] досліджувалися частотні залежності модуля пружності гетерогенних матеріалів, який пов'язаний із швидкістю розповсюдження пружних хвиль відомими залежностями.

Швидкість розповсюдження пружної хвилі зручніше за все вимірювати імпульсним методом. В області фронтів імпульсного сигналу спектр

відрізняється від стаціонарного. Він змінюється від періоду до періоду несучої частоти і тому результати вимірювання за початковою частиною імпульсу не можуть бути віднесені до будь-якої визначеної частоти. У випадку матеріалів з високим демпфуванням спостерігається достатньо сильна дисперсія звукової хвилі, що обумовлює розмивання імпульсу. До того ж, амплітуда різноманітних спектральних складових зменшуються по-різному [135].

В гетерогенних матеріалах збудження однієї моди викликає виникнення цілого набору інших мод коливань, що розповсюджуються різними шляхами та з різною швидкістю та підсумовуючись на приймачі, змінюють форму прийнятого сигналу. Найбільш інформативною є початкова частина імпульсу, вільна від паразитних мод коливань. Тому в ряді технічних завдань (дослідження властивостей бетону, пластмас та т.п.) швидкість звуку вимірюють за фронтом сигналу [135].

Довгохвильові компоненти спектру зондуючого сигналу не чутливі до неоднорідностей середовища, а час їх розповсюдження залежить від довжини бази прозвучування та характеристик середовища, що були зазначені вище. Оскільки зі зміненням бази прозвучування спектральний склад сигналу змінюється в основному у високочастотному діапазоні, то можна констатувати несуттєву залежність швидкості пружних хвиль від довжини бази [136].

Таким чином, можна відмітити можливість використання акустичного методу дослідження дисипативних властивостей неметалевих гетерогенних матеріалів, заснований 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, напружено-деформованого стану матеріалу. До того ж, таким методом можна досліджувати не тільки зразки матеріалу, але і готові вироби, що характеризуються різноманітними конструктивними особливостями.

#### 1.4 Висновки щодо огляду літератури та постановка задач дослідження

– Використання неметалевих гетерогенних матеріалів в якості матеріалу для виготовлення машинобудівних деталей дозволяє вирішити широке коло техніко-економічних питань, серед яких спрощення та зменшення часу технологічного процесу виготовлення деталей, можливість виконання нових конструкцій, підвищення вібростійкості порівняно з традиційними конструкційними матеріалами.

– Неметалеві гетерогенні матеріали є доволі складними об'єктами для контролю, оскільки характеризуються анізотропією властивостей, великою різноманітністю типів структур, специфічними фізичними властивостями. Ефективне використання таких матеріалів та конструкцій з них потребує визначення достовірних значень характеристик демпфування, а також закономірності їх змінення в процесі навантаження.

– Встановлено, що дослідження дисипативних властивостей неметалевих гетерогенних матеріалів, для яких характерні складні процеси розсіювання енергії, відомими експериментальними методами призводить до значних похибок, не дає можливості визначити вплив кожного з окремо діючих механізмів дисипації енергії, а також встановити залежність дисипативних властивостей неметалевих гетерогенних матеріалів та виробів з них від особливостей експлуатації.

– Встановлено, що використання акустичного методу дослідження дисипативних властивостей неметалевих гетерогенних матеріалів, заснованого на вимірюванні швидкості розповсюдження пружних хвиль, які проходить через зразок матеріалу, що досліджується, дає можливість виявити залежність демпфування від амплітуди та частоти коливань, напружено-деформованого стану матеріалу, температурного режиму та дає можливість досліджувати не тільки зразки матеріалу, але і готові вироби.

Виходячи з вищеперерахованого, мету роботи можна сформулювати таким чином: 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.

## ГЛАВА 2

### АКУСТИЧНИЙ КОНТРОЛЬ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ НЕМЕТАЛЕВИХ ГЕТЕРОГЕННИХ МАТЕРІАЛІВ

#### 2.1 Механічні коливання та хвилі

Якщо в будь-якій точці середовища, в якому силовий вплив зазнають близько розташовані атоми або молекули, збуджений процес механічних коливань, то цей процес буде з розповсюджуватися від точки до точки з кінцевою швидкістю, що залежить від властивостей середовища. Так виникають механічні хвилі.

Механічні коливання, як і коливальні процеси будь-якої іншої природи, можуть бути вільними та вимушеними. Вільні коливання здійснюються під дією внутрішніх сил системи після виведення її із стану рівноваги. Коливання, що відбуваються під дією зовнішніх сил, що періодично змінюються, називаються вимушеними.

Розповсюдження хвиль різноманітної фізичної природи можна описати за допомогою однакових математичних рівнянь. Найбільш простим видом коливального процесу є прості гармонічні коливання, які описуються рівнянням:

$$x(t) = A \cos(\omega t + \varphi_0), \quad (2.1)$$

де  $x(t)$  – зміщення тіла від положення рівноваги;

$A$  – амплітуда коливань, тобто максимальне зміщення від положення рівноваги;

$\omega$  – циклічна або колова частота коливань;

$t$  – час;

$\varphi_0$  – початкова фаза гармонічного процесу

При додаванні двох гармонічних коливань однакового напрямку та частоти сумарний зсув буде:

$$x(t) = x_1 + x_2 = A_1 \cos(\omega t + \varphi_1) + A_2 \cos(\omega t + \varphi_2) = A \cos(\omega t + \varphi)$$

При цьому значення амплітуди  $A$  та початкової фази  $\varphi$  цього гармонічного коливання визначаються амплітудами вихідних коливань та їх початковими фазами.

Динамічні навантаження можна поділити на три групи [13]:

- навантаження, викликані роботою машин періодичної дії, що встановлені на плиті;
- рухомі навантаження;
- навантаження імпульсного та ударного характеру.

В реальних умовах роботи верстатів можлива одночасна дія всіх перерахованих видів навантаження. В цьому випадку частоти коливань будуть різні, що призводить до пульсації за величиною вектора  $A$  та його обертання із змінною швидкістю. Тому сумарний рух вже не буде гармонічним коливанням, а набуває характеру складного коливального процесу.

### 2.1.1 Розкладання періодичних коливань в ряд Фур'є

Складні динамічні сигнали можуть бути представлені як комбінація простих гармонічних компонентів. Кожний з компонентів має свою власну частоту та амплітуду і поєднується в різноманітних співвідношеннях з іншими компонентами. Система функцій має вид [137]:

$$f(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{i=1}^{\infty} (A_i \cos i\omega t \pm B_i \sin i\omega t), \quad (2.2)$$

де  $A_0, A_i, B_i$  – коефіцієнти Фур'є;



$i$  – ціле число від 1 до  $\infty$ , що називається гармонічним порядком.

Ряд Фур'є є періодичною функцією з періодом  $2\pi$ . Для періодичної функції часу аргумент  $x$  замінюється на кут  $\omega t$ . В результаті чого функція часу з  $F(\omega t)$  періодом

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (2.3)$$

представляється як накладання декількох косинусоїдальних та синусоїдальних коливань, частоти яких є цілими кратними самої низької частоти  $\omega$ , що називається основною частотою:

$$F(t) = \frac{A_0}{2} + A_1 \cos \omega t + A_2 \cos 2\omega t + \dots + A_i \cos i\omega t + \dots \quad (2.4)$$
$$+ B_1 \sin \omega t + B_2 \sin 2\omega t + \dots + B_i \sin i\omega t ,$$

або

$$F(t) = S_0 + S_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + S_2 \sin(2\omega t + \varphi_2) + \dots S_i \sin(i\omega t + \varphi_i) + \dots , \quad (2.5)$$

$$S_0 = \frac{A_0}{2}, S_i = \sqrt{A_i^2 + B_i^2}, \varphi_i = \arctg \frac{A_i}{B_i} . \quad (2.6)$$

Постійна складова  $S_0$  співпадає із середнім значенням функції  $F(t)$ .

При аналітичному задаванні  $f(x)$  ліва та права частини рівняння (2.4) помножуються на  $\cos ix$  та інтегруються за  $x$  від  $-\pi$  до  $+\pi$ . Так задаються коефіцієнти Фур'є:

$$\int_{-\pi}^{+\pi} f(x) \cos ix dx = \int_{-\pi}^{+\pi} \frac{A_0}{2} \cos ix dx + \dots \int_{-\pi}^{+\pi} A_k \cos kx \cos ix dx + \dots + \int_{-\pi}^{+\pi} B_k \sin kx \cos ix dx + \dots \quad (2.7)$$

Потім задаються по чергово всі значення  $i$  від 0 до  $\infty$ . При  $i = 0$  в правій частині рівняння (2.7) будуть дорівнювати нулю всі члени, окрім першого, величина якого буде  $A_0\pi$ , звідки

$$A_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} f(x) dx . \quad (2.8)$$

Якщо тепер задавати всі значення  $i$  від 0 до  $\infty$ , то в правій частині рівняння (2.7) для кожного значення ненульовим буде лише той інтеграл виду

$$\int_{-\pi}^{+\pi} A_k \cos kx \cos idx , \text{ для якого } i = k. \text{ Цей інтеграл доволі легко розраховується, та}$$

дорівнює  $A_i\pi$ . Всі інтеграли виду  $\int_{-\pi}^{+\pi} B_k \sin kx \cos idx$  обертаються в нуль. Таким

чином, вся права частина рівняння (2.6) дорівнює лише  $A_i\pi$ , звідки знаходимо коефіцієнти Фур'є, що розташовані перед косинусами [138]:

$$A_i = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} f(x) \cos idx , \quad (2.9)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots$$

Аналогічно цьому помножуючи обидві частини рівняння (2.7) на  $\sin ix$  та повторюючи тіж самі операції знаходять коефіцієнти Фур'є, що стоять перед синусами:

$$B_i = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} f(x) \sin idx , \quad (2.10)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots$$

## 2.1.2 Рівняння Лагранжа другого роду. Функція розсіювання

Якщо точкам механічної системи, що знаходиться в стані рівноваги, повідомити малі відхилення та малі початкові швидкості, то система буде здійснювати вільні коливання навколо положення стійкої рівноваги. В цьому випадку на матеріальні точки системи діють сили відновлення та сили опору. Положення системи, що має  $s$  ступенів свободи, в будь-який проміжок часу визначається  $s$  узагальненими координатами  $q_j$ , які в положенні рівноваги дорівнюють нулю.

Рівняння Лагранжа другого роду для системи з  $s$  ступенями свободи приймають вигляд [139]:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_j} = Q_{jP} + Q_{jR}, \quad (2.11)$$

де  $Q_{jP}$  – узагальнена сила, яка відповідає силам, що відновлюють;

$Q_{jR}$  – узагальнена сила, яка відповідає силам опору

$T$  – кінетична енергія.

Узагальнені сили, які відповідають силам, що відновлюють та мають потенціал розраховуються за формулою:

$$Q_{jP} = -\frac{\partial \Pi}{\partial q_j} \quad (j = 1, 2, \dots, s). \quad (2.12)$$

Для складання рівняння Лагранжа другого порядку необхідно знати вираз кінетичної енергії малих коливань системи  $T$  та потенційної енергії такої системи  $\Pi$ .

Малими коливаннями системи біля положення рівноваги називають такий рух системи, при якому значення узагальнених координат, що визначають положення системи та відрахованих від положення стійкої рівноваги, в будь-

який момент часу настільки малі, що їх можна розглядати як величини першого порядку малості.

Для механічної системи зі стаціонарними зв'язками, що має  $s$  ступенів свободи, радіус-вектор будь-якої точки системи є функцією  $s$  узагальнених координат:

$$\vec{r}_i = \vec{r}_i(q_1, q_2, \dots, q_s) . \quad (2.13)$$

Швидкість кожної точки системи розраховується так:

$$\vec{v}_i = \frac{d\vec{r}_i}{dt} = \frac{\partial \vec{r}_i}{\partial q_1} \dot{q}_1 + \frac{\partial \vec{r}_i}{\partial q_2} \dot{q}_2 + \dots + \frac{\partial \vec{r}_i}{\partial q_s} \dot{q}_s . \quad (2.14)$$

Підставивши це значення вектора швидкості у рівняння кінетичної енергії, отримуємо:

$$\begin{aligned} T &= \sum_{i=1}^n \frac{m_i v_i^2}{2} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n m_i v_i v_i = \\ &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n m_i \left[ \left( \frac{\partial \vec{r}_i}{\partial q_1} \right)^2 \dot{q}_1^2 + \dots + \left( \frac{\partial \vec{r}_i}{\partial q_s} \right)^2 \dot{q}_s^2 + 2 \frac{\partial \vec{r}_i}{\partial q_1} \frac{\partial \vec{r}_i}{\partial q_2} \dot{q}_1 \dot{q}_2 + \dots + 2 \frac{\partial \vec{r}_i}{\partial q_{s-1}} \frac{\partial \vec{r}_i}{\partial q_s} \dot{q}_{s-1} \dot{q}_s \right] . \end{aligned} \quad (2.15)$$

Отже, кінетична енергія системи  $T$  є однорідною квадратичною функцією узагальнених швидкостей  $\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_s$  з коефіцієнтами, що є функціями узагальнених координат:

$$T = \frac{1}{2} [A_{11} \dot{q}_1^2 + \dots + A_{ss} \dot{q}_s^2 + 2A_{12} \dot{q}_1 \dot{q}_2 + \dots + 2A_{s-1,s} \dot{q}_{s-1} \dot{q}_s] , \quad (2.16)$$

$$\text{де } A_{11} = \sum_{i=1}^n m_i \left( \frac{\partial \vec{r}_i}{\partial q_1} \right)^2 ; \dots ; A_{ss} = \sum_{i=1}^n m_i \left( \frac{\partial \vec{r}_i}{\partial q_s} \right)^2 ,$$

$$A_{12} = \sum_{i=1}^n m_i \frac{\partial \vec{r}_i}{\partial q_1} \frac{\partial \vec{r}_i}{\partial q_2} ; \dots ; A_{s-1,s} = \sum_{i=1}^n m_i \frac{\partial \vec{r}_i}{\partial q_{s-1}} \frac{\partial \vec{r}_i}{\partial q_s} .$$

Розташовуючи ці коефіцієнти в ряд Маклорена за ступенями узагальнення координат, отримуємо:

$$A_{ij}(q_1, q_2, \dots, q_s) = (A_{ij})_0 + \sum_{j=1}^s \left( \frac{\partial A_{ij}}{\partial q_j} \right)_0 q_j + \dots \quad (2.17)$$

Індекс 0 відповідає значенням функції в положенні рівноваги.

В останньому рівнянні можемо обмежитися лише першими постійними членами, оскільки розглядаються досить малі відхилення системи від положення рівноваги [139]:

$$(A_{ij})_0 = A_{ij}(0, 0, \dots, 0) \quad (2.18)$$

Позначивши ці постійні  $a_{ij}$ , отримуємо вираз для розрахунку кінетичної енергії:

$$T = \frac{1}{2} [a_{11} \dot{q}_1^2 + \dots + a_{ss} \dot{q}_s^2 + 2a_{12} \dot{q}_1 \dot{q}_2 + \dots + 2a_{s-1,s} \dot{q}_{s-1} \dot{q}_s] \quad (2.19)$$

Або в загальному вигляді:

$$T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^s a_{ij} \dot{q}_i \dot{q}_j \quad (2.20)$$

Постійні коефіцієнти  $a_{ij}$  називають коефіцієнтами інерції. Значення коефіцієнтів інерції та коефіцієнтів жорсткості  $c_{ij}$  визначають безпосередньо з відповідних рівнянь для  $T$  и  $P$ .

Враховуючи, що узагальнені координати та узагальнені швидкості розглядаються як величини першого порядку малості, то і диференційні

рівняння руху складаються з точністю до величин першого порядку малості [139]. Використаємо рівняння Лагранжа другого роду:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_j} = - \frac{\partial \Pi}{\partial q_j}. \quad (2.21)$$

$$(j = 1, 2, \dots, s).$$

Похідні  $\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j}$ ,  $\frac{\partial T}{\partial q_j}$ ,  $\frac{\partial \Pi}{\partial q_j}$  необхідно визначати з точністю до величин першого порядку малості.

При диференцуванні за узагальненими координатами та узагальненими швидкостями порядок малості зменшується на одиницю. Тому значення енергії  $T$  та  $\Pi$  потрібно розраховувати з точністю до величин другого порядку малості [139]. В цьому випадку рух системи визначається лінійними диференціальними рівняннями.

В реальних умовах вільні коливання системи затухають, оскільки на її матеріальні точки діють сили опору, пропорційні їх швидкостям:

$$\vec{R}_i = -v_i \vec{v}_i, \quad (2.22)$$

де  $v_i$  – коефіцієнт пропорційності.

При цьому відбувається розсіювання загальної механічної енергії. Узагальнені сили опору для конкретних узагальнених координат визначаються так:

$$Q_{1R} = \sum_{i=1}^n \bar{R}_i \frac{\partial \vec{r}_i}{\partial q_1}, \dots, Q_{sR} = \sum_{i=1}^n \bar{R}_i \frac{\partial \vec{r}_i}{\partial q_s}. \quad (2.23)$$

Для узагальнених сил опору отримуємо:

$$Q_{1R} = -\sum_{i=1}^n v_i \bar{v}_i \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial \dot{q}_1} = -\frac{\partial}{\partial \dot{q}_1} \sum_{i=1}^n \frac{v_i \bar{v}_i \bar{v}_i}{2} = -\frac{\partial}{\partial \dot{q}_1} \sum_{i=1}^n \frac{v_i \bar{v}_i^2}{2} ; \quad (2.24)$$

$$Q_{2R} = -\frac{\partial}{\partial \dot{q}_2} \sum_{i=1}^n \frac{v_i \bar{v}_i^2}{2}, \dots, Q_{sR} = -\frac{\partial}{\partial \dot{q}_s} \sum_{i=1}^n \frac{v_i \bar{v}_i^2}{2} .$$

Введемо до розгляду дисипативну функцію, або функцію розсіювання енергії:

$$\Phi = \sum_{i=1}^n \frac{v_i \bar{v}_i^2}{2} . \quad (2.25)$$

Узагальнені сили опору визначаються за наступними формулами:

$$Q_{1R} = -\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_1}; Q_{2R} = -\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_2}, \dots, Q_{sR} = -\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_s} . \quad (2.26)$$

Отже, у випадку стаціонарних зв'язків дисипативна функція – однорідна додатна квадратична функція узагальнених швидкостей:

$$\Phi = \frac{1}{2} [b_{11} \dot{q}_1^2 + \dots + b_{ss} \dot{q}_s^2 + 2b_{12} \dot{q}_1 \dot{q}_2 + \dots + b_{s-1,s} \dot{q}_{s-1} \dot{q}_s] . \quad (2.27)$$

Або в загальному вигляді:

$$\Phi = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^s b_{ij} \dot{q}_i \dot{q}_j . \quad (2.28)$$

де  $b_{ij}$  – постійні коефіцієнти.

Можна сказати, що:

$$\frac{d(T + \Pi)}{dt} = -2\Phi \quad (2.29)$$

Тобто величина  $2\Phi$  характеризує зменшення (розсіювання) енергії системи ( $T + P$ ) в одиницю часу.

## 2.2 Розповсюдження пружних хвиль у середовищі

Акустичний контроль фізико-механічних властивостей матеріалів це багатосторонній метод дослідження, що використовується при визначенні характеристик та аналізі матеріалів. Найбільш відомими галузями використання акустичних хвиль є товщинометрія та дефектоскопія. Однак, він також може застосовуватись для визначення та оцінювання деяких механічних або структурних якостей 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 акустичної хвилі, що проходить через матеріал (час проходження, поглинання, розсіювання та частотний спектр), може бути пов'язана зі зміною таких фізичних властивостей як твердість, модуль пружності, щільність, однорідність або зернистість структури.

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. Такі матеріали характеризуються підвищеним розсіюванням та поглинанням акустичних хвиль порівняно з традиційними матеріалами.

Поглинання представляє собою безпосереднє перетворення звукової енергії в тепло, що обумовлено великою кількістю процесів [140]. Це свого роду гальмування коливань часток. Оскільки при швидких коливаннях енергії втрачається більше, ніж при повільних, то поглинання в гетерогенних, як правило, збільшується пропорційно частоті.



Розглянемо механізм розсіювання. Його можна представити геометрично [141]. При зустрічі акустичної хвилі із неоднорідністю, звуковий опір матеріалу різко змінюється, оскільки стикаються, по суті, різні за щільністю речовини. На похилій межі розділу звукова хвиля розділяється на відбиті та прониклі види хвиль. Для кожної з таких хвиль процес буде повторюватися на іншій межі включення. Таким чином від первісної звукової хвилі весь час відокремлюються окремі складові хвилі, які на своєму довгому та складному шляху все більше перетворюються на тепло, внаслідок поглинання.

Необхідно також відмітити, що всі матеріали в деякій мірі працюють в якості фільтра високих частот, поглинаючи та розсіюючи високочастотні елементи хвильового діапазону більше, ніж низькочастотні. Тому аналіз спектру частот імпульсу зондування при проходженні через досліджуваний матеріал дозволяє оцінити сумісний ефект поглинання та розсіювання.

Найбільш доступним для вимірювання акустичним параметром є швидкість звука. Вона напряду визначається модулем пружності, коефіцієнтом Пуассона та щільністю матеріалу. Тому зміна одного з цих параметрів впливає на час проходження імпульсу базою прозвучування. Більш того, на швидкість звуку також впливає і структура матеріалу та напружено-деформований стан.

При прикладанні навантаження його дія не передається миттєво всім частинам тіла. Від навантаженої області починають випромінюватися хвилі навантажень та деформацій з кінцевою швидкістю. В залежності від напрямку коливання часток матеріалу по відношенню до напрямку розповсюдження хвилі розрізняють повздовжні, поперечні, поверхневі та нормальні хвилі [141]. В таблиці 2.1 наведені типи хвиль та їх характеристики.

Якщо напрямок коливань часток в контрольованому матеріалі співпадає з напрямком розповсюдження хвилі, то така хвиля називається повздовжньою. Вона може розповсюджуватися як в твердому тілі, так і в рідкому та газоподібному середовищі.

Якщо напрямок коливань часток перпендикулярний напрямку розповсюдження хвилі, то такі хвилі поперечні. Вони виникають лише в твердому тілі, яке спроможне пружно спричиняти опір деформації зсуву.

Таблиця 2.1 – Типи хвиль в твердому тілі

Хвилі	Характеристика	Середовище розповсюдження	Швидкість розповсюдження
Повздовжні	Коливання в напрямку розповсюдження хвилі	Безмежне тверде тіло	$c_l$
Поперечні	Коливання перпендикулярно напрямку розповсюдження хвилі	Безмежне тверде тіло	$c_t = 0.55c_l$
Поверхневі (Релея)	Елептичні коливання часток поблизу поверхні	Поверхні напівбезмежного тіла	$c_s = 0.93 c_t = 0.55c_l$
Головні	Хвилі затухають вздовж поверхні, викликаючи поперечні хвилі	Поверхні напівбезмежного тіла	$c_t$
Нормальні несиметричні (Лемба)	Згин пластини зі зсувом	Нескінченна пластинка товщиною $h$	При $h/\lambda \rightarrow 0$ $c_{pa0} \rightarrow 0$
Нормальні симетричні (Лемба)	Повздовжні коливання зі зміною поперечних розмірів	Нескінченна пластинка товщиною $h$	При $h/\lambda \ll 1$ $c_{pa0} = 0.9 c_l$

Продовження таблиці 2.1

Хвилі	Характеристика	Середовище розповсюдження	Швидкість розповсюдження
Поперечні нормальні (варіант хвиль Лемба)	Поперечні коливання в напрямку, паралельному поверхні пластини	Нескінченна пластина товщиною $h$	При $h/\lambda = 0$ $c_{pt} \rightarrow c_t$
Хвиля згину	Згин стрижня зі зсувом	Нескінченний стрижень діаметром $d$	При $d/\lambda = 0$ $c_{ba0} \rightarrow 0$

На вільній поверхні твердого тіла можуть збуджуватися поверхневі хвилі (хвилі Релея), частки в яких рухаються еліпсоїдною траєкторією. Такі хвилі локалізовані лише в тонкому поверхневому шарі, оскільки амплітуда коливань часток зменшується по мірі віддалення від поверхні за експонентою [144].

В пласких тілах та тілах постійної товщини можна збуджувати нормальні хвилі (хвилі Лемба), які пов'язані з хвилевим механізмом розповсюдження пружних коливань.

Різні типи хвиль мають різні швидкості розповсюдження [13]:

$$\begin{aligned}
 (\lambda + G) \frac{\partial e}{\partial x} + G \cdot \nabla^2 \cdot u - \rho \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= 0, \\
 (\lambda + G) \frac{\partial e}{\partial y} + G \cdot \nabla^2 \cdot v - \rho \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} &= 0, \\
 (\lambda + G) \frac{\partial e}{\partial z} + G \cdot \nabla^2 \cdot w - \rho \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} &= 0,
 \end{aligned}
 \tag{2.30}$$

$$\text{де } \nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2};$$

$\lambda$  – довжина хвилі, м;

$G$  – модуль зсуву, ГПа;

$\rho$  – щільність матеріалу,  $\text{кг/м}^3$ ;

$u, v, w$  – переміщення, м;

$e$  – об'ємне розширення,  $\text{м}^3$ .

У випадку, коли деформація складається лише з викривлення зсуву та обертання, тоді рівняння (2.30) трансформуються так:

$$\begin{aligned}G \cdot \nabla^2 \cdot u - \rho \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= 0, \\G \cdot \nabla^2 \cdot v - \rho \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} &= 0, \\G \cdot \nabla^2 \cdot w - \rho \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} &= 0,\end{aligned}\tag{2.31}$$

Якщо викликані хвилями деформації, не супроводжуються обертанням, то такі хвилі називаються хвилями викривлення. Обертання будь-якого елемента середовища визначається формулами, наведеними в роботі [142]:

$$\begin{aligned}\omega_x &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right), \\ \omega_y &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right), \\ \omega_z &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right).\end{aligned}\tag{2.32}$$

$$\begin{aligned}\left( \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) &= 0, \\ \left( \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) &= 0, \\ \left( \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) &= 0.\end{aligned}\tag{2.33}$$

Якщо умови (2.32) та (2.33) виконуються, то переміщення  $u, v, w$  можна вивести з функції таким чином:

$$u = \frac{\partial \varphi}{\partial x}, \quad v = \frac{\partial \varphi}{\partial y}, \quad w = \frac{\partial \varphi}{\partial z}. \quad (2.34)$$

Тоді

$$e = \nabla^2 \varphi, \quad (2.35)$$

$$\frac{\partial e}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x^2} \nabla^2 \varphi = \nabla^2 u \quad (2.36)$$

Підставляючи ці вирази до (2.30), отримаємо:

$$\begin{aligned} (\lambda + 2G)\nabla^2 \cdot u - \rho \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= 0, \\ (\lambda + 2G)\nabla^2 \cdot v - \rho \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} &= 0, \\ (\lambda + 2G)\nabla^2 \cdot w - \rho \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} &= 0. \end{aligned} \quad (2.37)$$

В результаті суперпозиції хвиль викривлення та хвиль розтягування отримуємо загальний випадок розповсюдження хвиль у пружному середовищі [142]. Для обох видів хвиль рівняння руху виражаються у загальній формі:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = a^2 \nabla^2 \psi, \quad (2.38)$$

де для випадку повздовжніх хвиль маємо:

$$a = c_1 = \sqrt{\frac{\lambda + 2 \cdot G}{\rho}}, \quad (2.39)$$

а для випадку поперечних хвиль:

$$a = c_2 = \sqrt{\frac{G}{\rho}}, \quad (2.40)$$

де  $c_1, c_2$  – швидкості розповсюдження повздовжніх та поперечних хвиль, м/с;

$G$  – модуль зсуву матеріалу, ГПа.

Модуль зсуву матеріалу  $G$  пов'язаний з модулем пружності та коефіцієнтом Пуассона залежністю:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad (2.41)$$

де  $E$  – модуль пружності матеріалу, ГПа;

$\nu$  – коефіцієнт Пуассона матеріалу.

В роботі [13] показані залежності швидкості розповсюдження повздовжніх та поперечних хвиль у синтеграні від його фізико-механічних характеристик:

$$c_1 = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho}}, \quad (2.42)$$

$$c_2 = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}. \quad (2.43)$$

Розповсюдження пружної хвилі відбувається за аналогією із законами геометричної оптики. У випадку непаральності напрямку розповсюдження хвилі поверхні об'єкту контролю, отримуємо результати, що відповідають відбиттю хвилі від вільної поверхні або відбиттю та переломленню на поверхні розділу середовищ [143].

Розповсюдження збуджень в однорідному ізотропному середовищі підпорядковується закону Гука. Воно представляється за допомогою суперпозиції повздовжніх хвиль зі швидкістю розповсюдження  $c_1$  та поперечних хвиль зі швидкістю  $c_2$ . Якщо початкове збудження обмежене кінцевою областю всередині тіла, швидкості  $c_1$  та  $c_2$  є єдиноможливими швидкостями

розповсюдження хвиль навідь у тому випадку, коли на фронтах хвиль є розриви швидкостей часток [13].

Відношення повздовжньої та поперечної швидкостей залежить від коефіцієнта Пуассона середовища. Якщо поперечна хвиля розповсюджується в безмежному ізотропному середовищі, то всі напрямки поперечних коливань равноправні. Якщо існує обмежуюча поверхня, наприклад поверхня розділу середовища, під кутом до якої розповсюджується поперечна хвиля, то питання щодо напрямку коливань в поперечній хвилі по відношенню до цієї поверхні стає доволі важливим [8, 144].

У випадку наявності вільних меж або поверхні розділу між двома середовищами можливі і інші види акустичних хвиль в матеріалі. При цьому також можуть з'являтися поверхневі хвилі. На великій відстані від джерела деформації такі хвилі можна вважати двомірними [143].

### 2.3 Перетворення акустичної хвилі при проходженні через неметалевий гетерогенний матеріал

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,  $\beta$  – коефіцієнт згасання пружних хвиль. Процес змінення форми сигналу можна описати співвідношенням [81]:

$$u_2(t, C, \beta) = K_1 K_2 K_3 u_1(t) , \quad (2.44)$$

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 [81]:

$$K_3 = e^{-\beta S} \sin[2\pi f(t - S/C)], \quad (2.45)$$

де  $S$  – база прозвучування, м;

$f$  – частота коливань, Гц.

Декремент затухання та коефіцієнт затухання коливань пов'язані співвідношенням:

$$\beta = \frac{\lambda}{T} = \lambda f, \quad (2.46)$$

де  $T$  – період коливань, с.

Підставивши (2.46) та (2.43) в рівняння (2.45) отримуємо залежність коефіцієнта  $K_3$  від параметрів матеріалу:

$$K_3 = e^{-\lambda S} \sin \left[ 2\pi f \left( t - S / \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \right) \right]. \quad (2.47)$$

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:



$$K_3 = \sum_{i=1}^n e^{-\lambda_i f_i S} \sin \left[ 2\pi f_i \left( t - S / \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \right) \right], \quad (2.48)$$

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:

$$u_2(t, E, \rho, \nu, \lambda) = u(t) \cdot \sum_{i=1}^n e^{-\lambda_i f_i S} \sin \left[ 2\pi f_i \left( t - S / \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \right) \right]. \quad (2.49)$$

З метою визначення особливостей формування акустичного поля в неметалевих гетерогенних матеріалах розглянемо спрощену структурну модель такого матеріалу на мезо- та макрорівнях (рис. 2.1) [81].

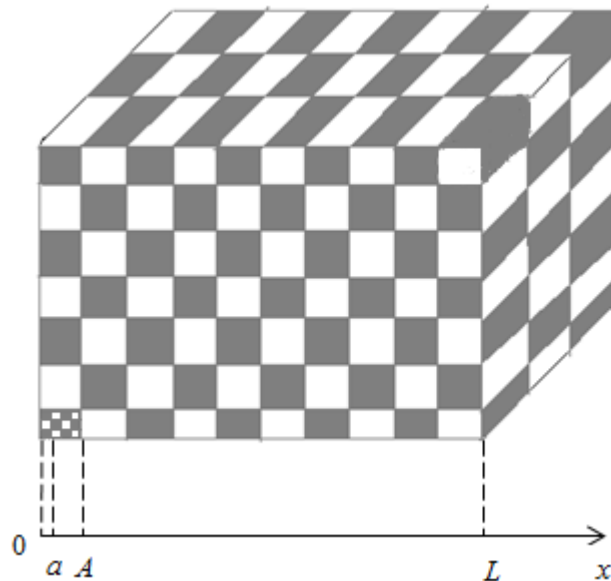
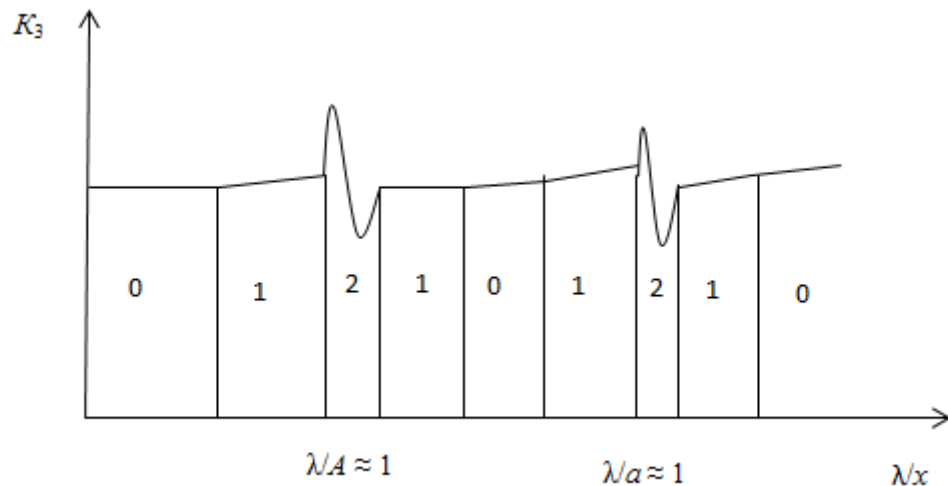


Рисунок 2.1 – Структурна модель неметалевого гетерогенного матеріалу

В неметалевому гетерогенному матеріалі акустичне поле формують елементи, щонайменше, трьох ієрархічних рівнів [70]. Нехай  $L$ ,  $A$  та  $a$  – характерні лінійні розміри об’єму матеріалу, гетерогенних об’ємів мезорівня та макрорівня відповідно, причому  $L \gg A \gg a$ . Вплив матеріалу на швидкість

розповсюдження пружної хвилі можна задати через коефіцієнт передачі  $K_3$ , що пов'язує його значення до та після проходження через матеріал. Залежність цього коефіцієнту від хвилевих розмірів елементів структури матеріалу представлена у відповідності з рисунком 2.2 [89].



0 – зона довго хвильового приближення для елементів відповідного ієрархічного рівня; 1 – перехідна зона; 2 – зона найбільшого прояву аномального впливу елемента відповідного рівня на параметр пружної хвилі

Рисунок 2.2 – Коефіцієнт передачі параметру пружної хвилі, що проходить через неметалевий гетерогенний матеріал

В кожній зоні закономірності формування акустичних полів суттєво відрізняються від інших, а їхні параметри несуть інформацію щодо властивостей матеріалу в цілому, ансамблю або окремих елементів мезорівня.

#### 2.4 Ознаки, що характеризують об'єкт контролю

На практиці акустичного контролю фізико-механічних властивостей матеріалу необхідно починати з аналізу деяких характеристик об'єкту контролю, які значною мірою можуть вплинути на точність вимірювання.

В першу чергу необхідно проаналізувати характер напружено-деформованого стану об'єкту. Аналізу підлягають тип напружень (одно-, двовісне, кручення, згин та ін.), співвідношення нормальних та дотичних напружень. Особливе значення мають також визначення конфігурації та лінійних розмірів об'єкту дослідження в обраному напрямку.

В тому випадку, коли можливість створення ідеальних умов для проведення акустичних вимірювань відсутня, виникає необхідність подолання деяких труднощів методичними прийомами [62]. Відмітимо основні фактори, що визначають умови контролю:

- умови встановлення перетворювача;
- доступ до поверхні введення-виведення акустичних хвиль;
- чистота поверхні;
- тип перехідного шару;
- температура поверхні об'єкта;
- умови розповсюдження пружних хвиль в матеріалі (в основному затухання хвиль).

Перераховані особливості визначають вибір типу датчиків та параметрів пружних хвиль.

Необхідно знати акустичні властивості матеріалу об'єкта контролю, наявність анізотропії (в тому числі і акустичну) та структуру [62].

Результати контролю можуть бути викривлені через відсутність відомостей щодо передісторії матеріалу, яка визначається технологією отримання похідного матеріалу та умовами його роботи (навантаження, опромінення та ін.). Такі фактори можуть впливати на змінення швидкості розповсюдження звукової хвилі значно більше ніж, наприклад, механічні напруження. Необхідно також враховувати стан поверхні та непостійність контакту [62].

Деякі фактори не викликають залишкових явищ, наприклад, температура, деякі – викликають, наприклад, опромінення, а деякі можна усунути, наприклад, перехідне середовище та непостійність контакту. Але всі вони

безумовно важливі та повинні бути враховані при розробці методики вимірювань.

## 2.5 Апаратура, що використовувалась при дослідженнях

При вимірюваннях швидкості пружних хвиль використовувався стенд «Дельфін-1М». Він є агрегатизованим вимірювально-інформаційним комплексом, призначеним для експертної підтримки персоналу на СТО при діагностиці двигунів автомобілів. До складу комплексу входять вимірювачі тиску, електричні адаптери, а також комплект віброакустичних датчиків. Існує можливість виведення на екран монітору будь-якого діючого вимірювального сигналу у вольтах.

На рисунку 2.1 наведений зовнішній вигляд стенду «Дельфін-1М».

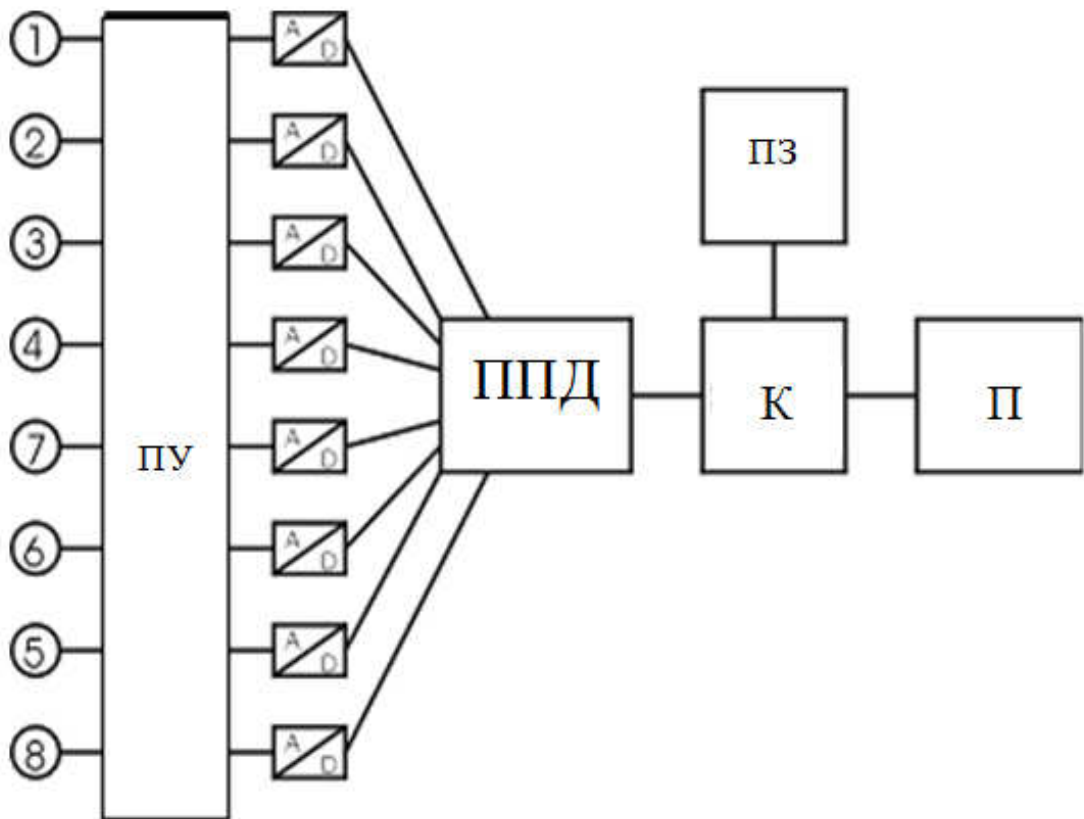


Рисунок 2.3 – Зовнішній вигляд стенду «Дельфін-1М»

Стенд містить вісім вимірювальних каналів (рис. 2.4). В таблиці 2.2 наведене їх рекомендоване використання, у випадку якого кольорові позначення на датчиках та на всіх параметрах обробки співпадають.

Таблиця 2.2 – Рекомендоване використання каналів стенду «Дельфін-1М»

Вимірювальний параметр	Канал
Конструкційна акустика в полосі частот (25...40) кГц	Канал 1 та 2
Вібрації в полосі частот (5...10000) Гц	Канал 3
Вібрації в полосі частот (5...180) Гц	Канал 4
Електрична напруга (0...32) В	Канал 5
Тиск (0...25) МПа	Канал 6
Сигнал початку відліку	Канал 7
Електрична напруга (0...30000) В	Канал 8



1-8 адаптери; ПУ – пристрій узгодження; А/D – комплект аналогово-цифрових перетворювачів; ППД – пристрій передачі даних; ПЗ – програмне забезпечення; К – комп’ютер; П – принтер

Рисунок 2.4 – Блок-схема стенду «Дельфін-1М»

Сигнали з восьми датчиків вводяться до блоку електроніки, який забезпечує комутацію, узгодження, попередню фільтрацію та введення даних до комп'ютеру за допомогою аналогово-цифрового перетворювача (вхідна напруга  $\pm 10$  В, розрядів – 12). Частота опитування кожного каналу – 70000 разів за секунду.

В таблиці 2.3 наведені коефіцієнти підсилення за каналами 1-8 пристрою передачі даних

Таблиця 2.3 – Типові значення коефіцієнтів підсилення пристрою передачі даних стенду «Дельфін-1М» за каналами 1–8

Ступень підсилення	0	1	2	3	4	5	6	7
Значення коефіцієнту підсилення	1	3	10	30	100	300	1000	3000

Оператор візуально відмічає сигнали, які його цікавлять. При цьому реалізується координатні, часові, фазо-циклові та спектральні алгоритми обробки сигналів.

Існує можливість провести безперервний запис «поверх записаного», який дозволяє зафіксувати останні вісім секунд з тривалих спостережень.

Розглянемо можливості програмного забезпечення стенду «Дельфін-1М». Воно дозволяє:

- введення вимірювальних даних протягом восьми секунд;
- представлення на екрані введених даних та зазначення фрагменту, що обраний для детального аналізу;
- горизонтальне та вертикальне масштабування на екрані;
- режим представлення «біжучий рядок»;
- дешифрування вимірювальних даних в одиницях вимірювального параметру;

- амплітудно-частотний аналіз;
- одинарне та подвійне інтегрування;
- фазо-цикловий аналіз;
- складання векторів (траєкторний аналіз);
- визначення часу будь-якого фрагменту;
- вивчення різниці у часі надходження деформаційних хвиль в різні точки конструкції та локалізація дефектів;
- накопичення даних за параметрами об'єктів діагностики;
- накопичення вимірювальних та оброблених даних;
- восьми-канальне осцилоскопіювання;
- регуляція затримки початку введення інформації.

Електромагнітна сумісність забезпечується використанням екранованої кабельної мережі, заземленням комп'ютера, електронного блоку та об'єкту контролю. Кліматичні умови експлуатації визначаються використанням комп'ютерної техніки загального призначення (кімнатна температура та помірна вологість, захист від ударів, наявність надійного заземлення, джерела безперебійного живлення та т.п.).

В блоці електроніки передбачені всі конструктивні міри щодо попередження міжканального взаємного впливу, а також перевантаження.

Шляхом розширення номенклатури датчиків та додаткового програмно-методичного забезпечення «Дельфін-1М» може використовуватися багатьох галузях, де існують аналогічні проблеми (енергетика, машинобудування, транспорт та ін.).

При вимірюванні швидкості звуку використовувалися п'єзоелектричні ультразвукові датчики конструкційної акустики серії АВС 117 з власними частотами та міцністю, що забезпечують необхідні діапазони вимірювання. В найбільш простих випадках зв'язок датчика з об'єктом контролю можна здійснити за допомогою масла або воску, особливо для орієнтовних вимірювань при низьких та середніх частотах. Шорсткі поверхні необхідно покривати проміжним шаром з силіконового мастила для покращення зв'язку між

датчиком та об'єктом контролю. Знімання електричного сигналу можна здійснювати або шляхом притискання датчика, або наклеюванням на відповідні точки досліджуваного зразка. Другий варіант знімання сигналу є переважним, оскільки забезпечується кращий контакт перетворювача з поверхнею об'єкта дослідження, а також з метою усунення похибки позиціонування.

За фізичною сутністю п'єзоелектричний датчик можна представити керамічним конденсатором, на обкладинках якого з'являється електричний заряд під дією вимірюваного зусилля. Повну амплітудно-частотну характеристику датчика прискорення отримують множенням його електричної та механічної передаточних функцій.

Оскільки акселерометри – це генератори переважно реактивної енергії, вони чутливі до різного роду завад (електричних, теплових, деформаційних) та вимагають підсилення вихідного сигналу.

Нижня межа частотного діапазону вимірювання обмежується шумами в підсилювальній апаратурі, верхня – резонансною частотою датчика. На практиці її додатково обмежують за допомогою фільтра низьких частот.

Постійна складова прискорення п'єзоелектричними датчиками не фіксується. Активний вхідний опір узгоджувальних пристроїв, що виконані за схемою підсилювачів напруги, складає одиниці мегаом. Це обумовлює високі вимоги до конструктивного захисту кіл від електричних завад.

Особлива увага приділяється екрануванню вхідних ланцюгів та вірній організації заземлення ліній «загальний» та «корпус». Крім виконання загальних правил (засоби екранування не повинні бути силовими елементами конструкцій або ділянками струмонесучих кіл), використовується диференційна схема вмикання датчиків та деякі конструктивні заходи. Реально апаратурні широкосмугові шуми вібровимірювальних каналів досягають одиниць відсотків.

В підсилювачі заряду реалізується режим короткого ємнісного замикання. Тому активний опір вхідного кола може бути зменшений.



Особлива увага приділена вибору крутизни високочастотних схилів амплітудно-частотних характеристик фільтрів. Вона повинна задовольняти двом суперечливим вимогам: повинна бути достатньо крутною, для того, що подавляти позадіапазонні спектральні складові, але не допускати характерного «дзвону» під дією сигналів ударного типу. Встановлено компромісне значення – до 10 дБ/октаву.

Напрявлення та полярність вимірювальних осей позначені на корпусах чутливих елементів датчиків. Ультразвукові датчики можуть бути довільно але однаково орієнтованими.

П'єзоелектричні акселерометри загального призначення АВС 117 (рис. 2.3) використовуються для вимірювання вібраційних та ударних прискорень в багатьох галузях промисловості для тестових випробувань конструкцій та машин.



Рисунок 2.5 – Зовнішній вигляд датчика АВС 117

Акселерометр має чутливий елемент, що працює на розтягнення-стискання, ізольовану електричну схему, високу власну частоту, віброміцність та надійність. Корпус акселерометра герметично ущільнений.

Датчик АВС 117 має такі технічні характеристики:

- робочий діапазон частот – 30000 Гц;

- верхня межа вимірюваних прискорень (вібраційних) –  $50000 \text{ м/с}^2$ ;
- верхня межа вимірюваних прискорень (ударних) –  $100000 \text{ м/с}^2$ ;
- ємність –  $(2200 \pm 330) \text{ пФ}$ ;
- коефіцієнт перетворення на амплітудному значенні за напругою (без навантаження) –  $0,11 \pm 0,016 \text{ мВс}^2/\text{м}$ ;
- коефіцієнт перетворення на амплітудному значенні за напругою (при навантаженні ємністю  $2500 \text{ пФ}$ ) –  $0,05 \pm 0,0075 \text{ мВс}^2/\text{м}$ ;
- коефіцієнт перетворення на амплітудному значенні за зарядом –  $0,24 \pm 0,04 \text{ пКлс}^2/\text{м}$ ;
- робочий діапазон температур – від  $-253 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $+200 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- поперечна чутливість –  $5 \%$ ;
- власна частота – не менше  $90 \text{ кГц}$ ;
- опір ізоляції – не менше  $100 \text{ МОм}$ ;
- основна похибка – не більше  $10 \%$ ;
- нерівномірність АЧХ  $\pm 1 \text{ дБ}$ .

Гранично допустимі режими експлуатації обмежуються механічною міцністю.

Дешифрування вимірювальних даних проводиться автоматично за формулою:

$$A_i = U_i / K_\delta / K_y / 2 , \quad (2.50)$$

де  $A_i$  – виміряне значення віброприскорення,  $\text{м/с}^2$ ;

$U_i$  – прирощення напруги за шкалою монітора, В;

$K_\delta$  – розрахована з урахуванням всіх поправок чутливість датчика,  $\text{мВс}^2/\text{м}$ ;

$K_y$  – коефіцієнт підсилення каналу.

З метою зниження вимог до швидкості передачі даних, в якості інформативної компоненти акустичних імпульсів приймають їх модульовану за амплітудою компоненту. Амплітуди та частоти модульованого сигналу

відображають вібраційний процес. Демодуляція здійснюється методом амплітудного двонапівперіодного детектування та низькочастотної фільтрації.

## 2.6 Аналіз похибок акустичних вимірювань

При акустичних вимірюваннях необхідно мати на увазі, що високочастотні складові спектру звукового імпульсу передаються п'єзоелектричними датчиками непропорційно їхньому фактичному змісту. Гармоніки з частотами, що входять в область резонансу будуть в запису завищеними. В цей же час складові із частотами, які припадають на післярезонансну область, будуть заниженими. Тому при аналізі сигналу, отриманого за допомогою акселерометричної апаратури, необхідно встановлювати деяку межу частоти, вище якої проводити аналіз неможливо через викривлення вимірювального сигналу. Аналізу підлягають лише складові, з частотою не вище встановленої межі.

Значення коефіцієнтів Фур'є для прискорення можуть бути знайдені чисельно, за даними аналізу зміщення. Для цього кожний коефіцієнт, що отриманий з аналізу запису зміщення помножується на квадрат відповідної частоти. Якщо крім цього необхідно знайти форму кривої прискорення та максимальні значення функції, то доводиться вдаватися до синтезу розрахованих гармонічних складових прискорення. Синтез виконується або графічно, або розрахунковим шляхом. При цьому можуть бути використані шаблони, що застосовуються для гармонічного аналізу [145].

Розглянемо складові інструментальної похибки акустичних вимірювань. Апаратурні широкосмугові шуми вібровимірювальних каналів досягають одиниць відсотків. Паразитна поперечна чутливість п'єзоелектричних датчиків може досягати 8 %.

На складних технічних об'єктах реалізована амплітудна похибка широкосмугових вібровимірювань, що дорівнює 20 %, вважається прийнятною. При вузькосмугових вимірюваннях похибка не перевищує 5 %. В

запропонованому методі першочергову роль грає врахування фазо-часових характеристик задіяної апаратури. На каналі 4 фазовий зсув не перевищує  $1^\circ/\text{Гц}$ . На інших віброакустичних каналах апаратурних фазових зсув набагато менший, та їм можна знехтувати. Тому найбільший вклад в похибку вимірювання швидкості розповсюдження пружних хвиль в матеріалі вносить похибка квантування за часом.

## 2.7 Підвищення точності вимірювання

Запропонований метод вимірювання дисипативних властивостей неметалевих гетерогенних матеріалів базується на залежності декременту затухання коливань від швидкості розповсюдження пружних хвиль в матеріалі. Швидкість хвилі визначається часом її проходження між двома п'єзоелектричними датчиками, розташованими на фіксованій відстані (так звана, база прозвучування). Проведений аналіз складових похибок вимірювання дисипативних властивостей неметалевих гетерогенних матеріалів показав, що точність вимірювання обмежується, в першу чергу, частотою опитування датчиків. Діагностичний комплекс «Дельфін-1М», який використовувався в експериментах для вимірювання часу проходження пружної хвилі від одного до другого п'єзоелектричного датчика, проводить опитування кожного вимірювального каналу з частотою  $70 \text{ кГц}$ . Знайдемо крок квантування за часом за формулою:

$$q_{\text{кв}} = \frac{1}{f_{\text{оп}}} = \frac{1}{70000} = 14 \text{ мкс}, \quad (2.51)$$

де  $q_{\text{кв}}$  – крок квантування, с;

$f_{\text{оп}}$  – частота опитування каналів, Гц.

Оскільки аналіз сигналу, що отриманий від п'єзоелектричних датчиків, проводиться оператором безпосередньо за графіком залежності переміщення

від часу, то округлення результату вимірювання здійснюється до ближчого квантового рівня. В цьому випадку похибка квантування не перевищує половини кроку квантування, тобто:

$$\Delta t = \Delta_{кв} = \frac{q_{кв}}{2} = \frac{14}{2} = 7_{мкс} \quad (2.52)$$

При вимірюванні швидкості розповсюдження пружних хвиль в матеріалі таке значення абсолютної похибки еквівалентно неприпустимо великому значенню відносної похибки. Наприклад, при розташуванні п'єзоелектричних датчиків на відстані 263 мм один від одного, враховуючи, що швидкість розповсюдження пружної хвилі в синтеграні приблизно 1900 м/с, різниця в часі сигналів від датчиків складає 132 мкс. Тоді відносна похибка вимірювання різниці в часі сигналів від датчиків буде:

$$\delta x = \frac{\Delta_{кв}}{t} \cdot 100\% = \frac{7}{132} \cdot 100\% \approx 5\% \quad (2.53)$$

Розрахунки сумарної похибки опосередкованих вимірювань дисипативних властивостей неметалевих гетерогенних матеріалів показали, що похибка квантування за часом, яка дорівнює 5 %, призводить до сумарної похибки більше, ніж в 30 %, що є неприпустимим. Необхідно відмітити, що зі зменшенням відстані між датчиками, тобто зі зменшенням бази прозвучування, яка обмежується фізичними розмірами деталей, що контролюються, відносна похибка вимірювання буде збільшуватися. Це суттєво обмежує можливість отримання адекватних результатів при використанні діагностичного комплексу «Дельфін-1М» для вимірювання дисипативних властивостей неметалевих гетерогенних матеріалів.

Проведені дослідження показали, що для забезпечення можливості отримання результатів вимірювання дисипативних властивостей неметалевих гетерогенних матеріалів з лінійними розмірами, що не перевищують декількох

десятьків міліметрів, необхідно, щоб похибка квантування за часом в абсолютній формі не перевищувала  $\pm 2$  мкс. Цього можна досягти шляхом підвищення частоти опитування вимірювальних каналів діагностичного комплексу «Дельфін-1М».

З метою досягнення необхідної точності вимірювання дисипативних властивостей неметалевих гетерогенних матеріалів пропонується 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. Це дозволяє практично одночасно отримувати вимірювальну інформацію від восьми датчиків. В роботі існує необхідність отримання даних тільки з двох вимірювальних каналів. Таким чином, є можливість підвищити частоту опитування каналів в чотири рази (з 70 кГц до 240 кГц) за рахунок зменшення кількості каналів, що опитуються. Тоді крок квантування складатиме:

$$q_{кв} = \frac{1}{f_{оп}} = \frac{1}{280000} = 3.6 \text{ мкс}$$

Похибка квантування, в свою чергу, буде дорівнювати:

$$\Delta_{кв} = \frac{3.6}{2} = 1.8 \text{ мкс}$$

Тобто, завдяки збільшенню частоти опитування вимірювальних каналів в чотири рази вдалося зменшити похибку квантування за часом з 7 мкс до 1,8 мкс. Розрахунки показали, що завдяки удосконаленню діагностичного комплексу «Дельфін-1М» сумарна похибка опосередкованого вимірювання деременту затухання коливань в неметалевих гетерогенних матеріалах не перевищує 10 %. При цьому прилад не потребує змінення та модернізації апаратної частини, а тільки змінення програми мікроконтролера.

На рисунку 2.6 наведений алгоритм програми опитування. Програмний код наведений в додатку А.

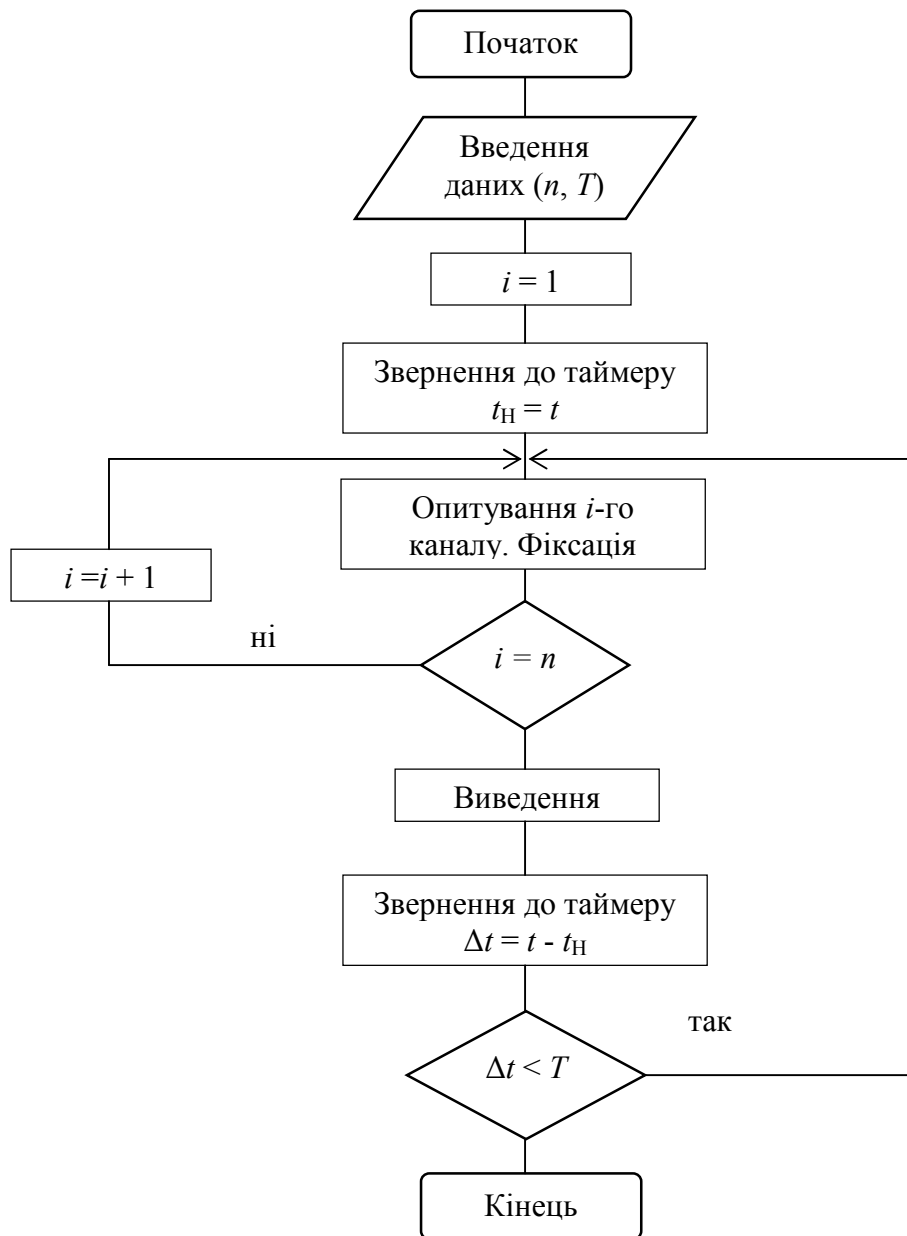


Рисунок 2.6 – Алгоритм програми опитування каналів

## 2.8 Висновки

– Встановлено, що найбільш інформативним та доступним для вимірювання акустичним параметром є швидкість звуку. Вона на пряму визначається модулем пружності та щільністю матеріалу. Більш того, на швидкість звуку також впливає і структура матеріалу та напружено-деформований стан.

– Показано, що на точність акустичних вимірювань значною мірою впливають такі фактори, як тип напружень (одно-, двовісне, кручення, згин та ін.), співвідношення нормальних та дотичних напружень, конфігурація об'єкту дослідження в обраному напрямку, акустичні властивості матеріалу об'єкту контролю, структура та анізотропія матеріалу (в тому числі і акустична), передісторія матеріалу, що визначається технологією отримання похідного матеріалу та умовами його роботи (навантаження, опромінення та ін.).

– Розроблена математична модель, що описує перетворення акустичної хвилі при проходженні через неметалевий гетерогенний матеріал в залежності від його фізико-механічних характеристик;

– За допомогою аналізу складових інструментальної похибки було встановлено, що апаратурні широкосмугові шуми вібровимірювальних каналів досягають одиниць відсотків, паразитна поперечна чутливість п'єзоелектричних датчиків може досягати 8 %. В запропонованому методі першочергову роль грає врахування фазо-часових характеристик задіяної апаратури. На каналі 4 фазовий здвиг не перевищує 1 °/Гц. На інших віброакустичних каналах апаратурних фазових здвиг набагато менший, та їм можна знехтувати.

– 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.



## РОЗДІЛ 3

### ОПИСАННЯ МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ ДИСИПАТИВНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ НЕМЕТАЛЕВИХ ГЕТЕРОГЕННИХ МАТЕРІАЛІВ

3.1 Методика визначення декременту затухання коливань в неметалевих гетерогенних матеріалах

Дослідження дисипативних властивостей неметалевих гетерогенних матеріалів за допомогою відомих методів може призвести до суттєвих похибок. Це пов'язано з неоднорідністю матеріалу, а відповідно, із складними процесами розсіювання енергії. У зв'язку з цим виникає необхідність розробки методів експериментального визначення дійсних значень характеристик дисипації енергії [1].

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, тобто статистичний метод дослідження впливу однієї або декількох незалежних змінних на залежну змінну. Отримана в результаті аналізу залежність декременту затухання коливань від модуля пружності матеріалу, наведена на рисунку 3.1.

В результаті аналізу було встановлено, що найкраще зв'язок декременту затухання коливань та модуля пружності неметалевого гетерогенного матеріалу описується математичною моделлю на базі поліному [146, 147]:

$$\lambda = 2,076 \cdot 10^{-5} \cdot E^2 - 2,109 \cdot 10^{-3} \cdot E + 0.073 , \quad (3.1)$$

де  $\lambda$  – декремент затухання коливань;

$E$  – модуль пружності матеріалу, ГПа

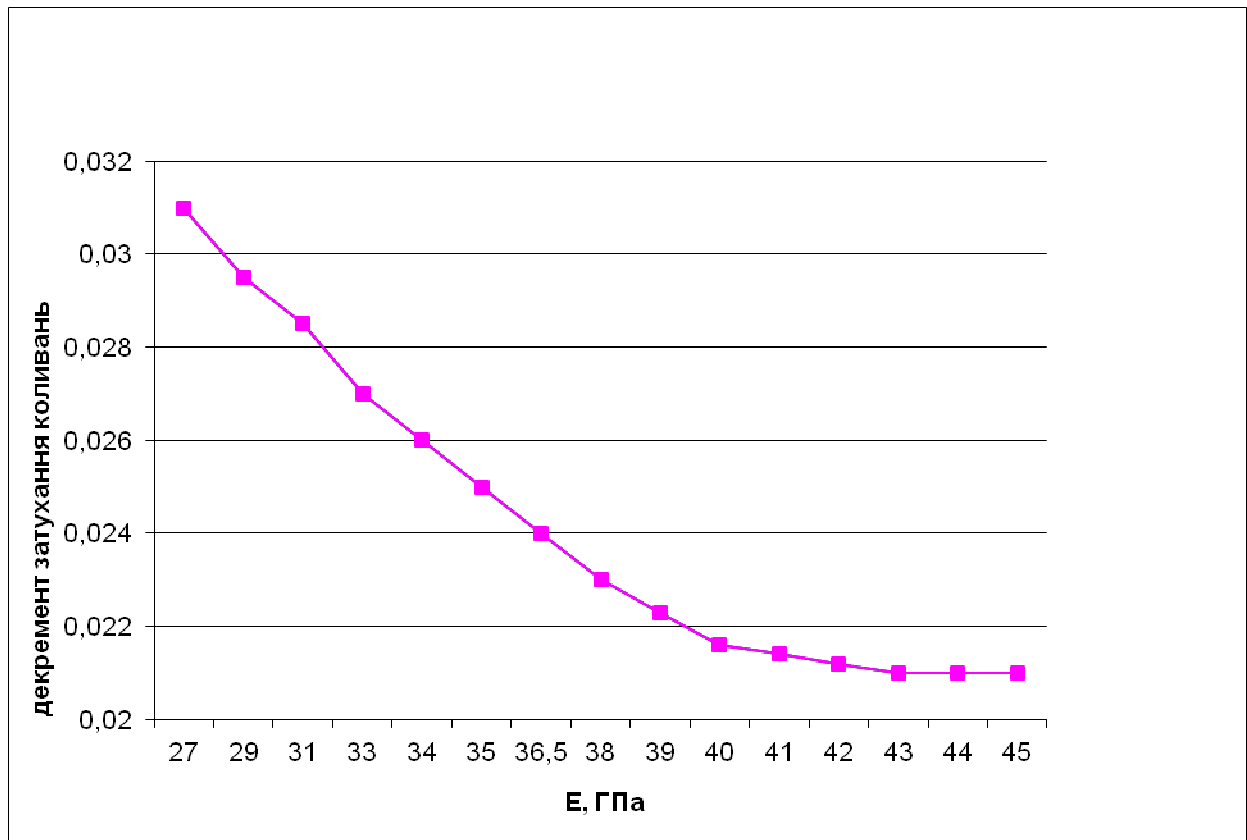


Рисунок 3.1 – Залежність декременту затухання коливань від модуля пружності матеріалу

Підставивши формулу (2.43) у формулу (3.1) отримуємо залежність декременту затухання коливань від швидкості пружних хвиль в синтеграні:

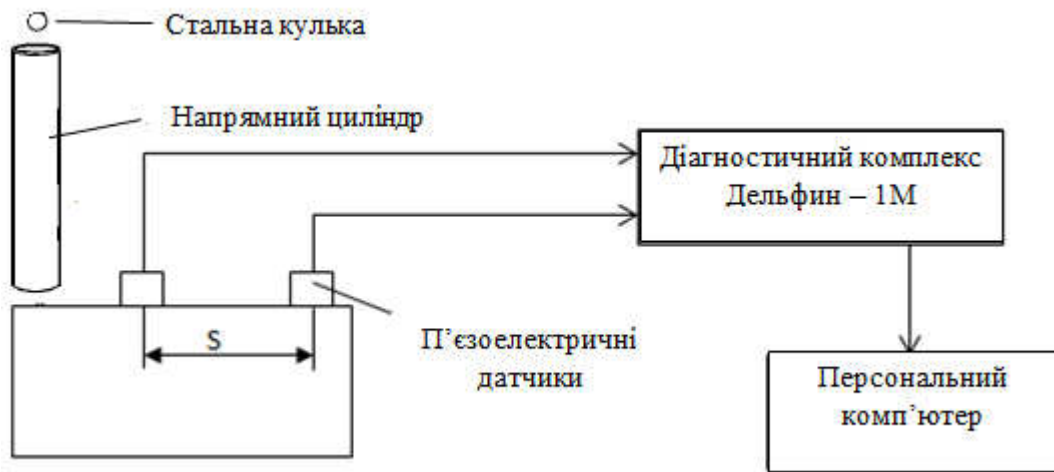
$$\lambda = 8,304 \cdot 10^{-5} \cdot \rho^2 \cdot (1 + \nu)^2 \cdot C^4 - 4,218 \cdot 10^{-3} \cdot \rho \cdot (1 + \nu) \cdot C^2 + 0.073 , \quad (3.2)$$

де  $C$  – швидкість розповсюдження поперечної пружної хвилі в синтеграні, м/с;

$\rho$  – щільність синтеграну, кг/м<sup>3</sup>,

$\nu$  – коефіцієнт Пуассона.

На рисунку 3.2 представлена схема вимірювання швидкості пружної поперечної хвилі, що проходить через зразок матеріалу.



$S$  – база прозвучування

Рисунок 3.2 – Схема вимірювання швидкості пружної хвилі

Перед початком вимірювань стенд «Дельфін-1М» заземлюють, акустичні п'єзоелектричні датчики підключають до блоку електроніки, встановлюють чутливість датчиків та обирають коефіцієнти підсилення для використовуваних каналів. Необхідно також впевнитись, що немає втрати вимірювальної інформації при введенні її до персонального комп'ютеру.

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. Гарований 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.

Сигнали з датчиків вводяться до блоку електроніки діагностичного комплексу «Дельфін-1М», що забезпечує комутацію, узгодження, попередню фільтрацію та введення вимірювальних даних до комп'ютера за допомогою аналогово-цифрового перетворювача. Частота опитування кожного каналу – 70000 раз на секунду.

При вимірюваннях дисипативних властивостей неметалевих гетерогенних матеріалів з великими втратами пружної енергії збудження однієї моди коливань викликає виникнення цілого ряду інших мод, які розповсюджуються різними шляхами з різноманітними швидкостями, та підсумовуючись у приймачі, змінюють форму сигналу зондування. В результаті цього, найбільш інформативною стає початкова частина імпульсного сигналу, що є вільною від паразитних мод коливання. Виходячи з цього швидкість звуку вимірюється за фронтом отриманих сигналів.

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

$$C = \frac{S}{\Delta t}, \quad (3.3)$$

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

Розподіл алгебраїчної суми великої кількості випадкових похибок з різними розподілами прямує до нормального (так званий розподіл великої кількості). Більше того, якщо серед похибок не має таких, що явно домінують над іншими, тобто вони приблизно є рівноважними, то вже при п'яти-шести складових розподіл їх алгебраїчної суми настільки близький до нормального, що для багатьох практичних завдань фактичний розподіл приймається як нормальний [148].

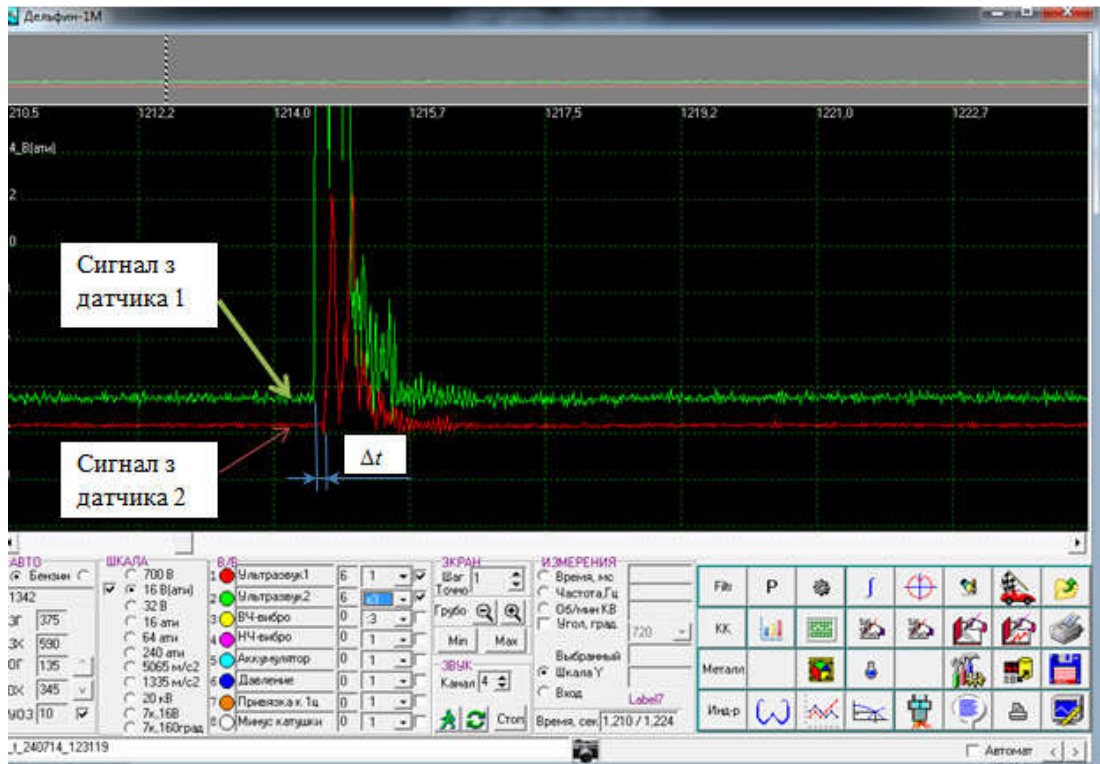


Рисунок 3.4 – Сигнали, отримані за допомогою стану «Дельфін-1М»

Були проведені дослідження двох зразків із синтеграну різноманітного складу по п'ять вимірювань декременту затухання коливань в кожному. В таблиці 3.1 наведені результати вимірювання.

Таблиця 3.1 – Результати вимірювання декременту затухання коливань

	Зразок 1	Зразок 2
Дослід 1	0,027	0,024
Дослід 2	0,028	0,027
Дослід 3	0,027	0,027
Дослід 4	0,027	0,027
Дослід 5	0,027	0,024
Середнє значення	0,0272	0,0258

Після проведення математичної обробки результатів вимірювання були отримані середні квадратичні відхилення 0,0002 та 0,0007 для першого та другого зразка відповідно.

Випадкова похибка вимірювання декременту затухання коливань розраховується за формулою:

$$\Delta_{\text{вип}} = \pm t_c \cdot \sigma, \quad (3.4)$$

де  $t_c = 2,77$  – коефіцієнт Стьюдента, що обирається в залежності від довірчої ймовірності (для лабораторних досліджень  $p=0,99$ ) та об'єму вибірки;

$\sigma$  – середнє квадратичне відхилення.

Підставивши значення, отримуємо:

$\Delta\lambda_{\text{вип}} = 0,0006$  – для першого зразка;

$\Delta\lambda_{\text{вип}} = 0,002$  – для другого зразка.

За результатами дослідження можна робити висновок щодо відсутності анізотропії зразків, що досліджувалися.

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.

### 3.2 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. Верстат призначений для горизонтального та вертикального фрезерування виробів з різноманітних матеріалів. На рисунку 3.5 наведений зовнішній вигляд об'єкта дослідження.



Рисунок 3.5 – Об’єкт дослідження. Фрезерний верстат серії ОММ

Базові деталі такого верстата вироблені з синтеграну, що забезпечує розмірну та геометричну точність, низьку шорсткість оброблених поверхонь.

На рисунку 3.6 представлені наклеєні на об’єкті дослідження п’єзоелектричні датчики при визначенні характеристик розсіювання енергії в матеріалі готового виробу.



Рисунок 3.6 – Розташування п’єзоелектричних датчиків під час дослідження дисипативних характеристик матеріалу у готовому виробі

На досліджуваній поверхні розташовувалися два ультразвукові п'єзоелектричні датчики. По поверхні завдавався удар. Тарований удар завдавався за допомогою підвішеної на нитці стальної кульки, діаметром 40 мм, що відводили на певний кут та відпускали. Місце удару розташовувалося на одній прямій з датчиками. Під час досліджень характеристик розсіювання енергії проводилися вимірювання швидкості поперечних пружних хвиль у відповідності до методики, наведеної в пункті 3.1.

Були проведені дослідження двох поверхонь об'єкта контролю по десять вимірювань на кожній. При цьому при перших п'яти вимірюваннях удар проводився біля одного давача (місце удару 1 на рисунку 3.7). Інші п'ять вимірювань здійснювалися при проведенні удару в місці 2. Тобто, проводилися вимірювання швидкості пружної хвилі, що розповсюджувалася в зворотному напрямку. Для дослідження анізотропії дисипативних характеристик необхідно проводити вимірювання швидкості пружних хвиль в одній площині в різних напрямках.

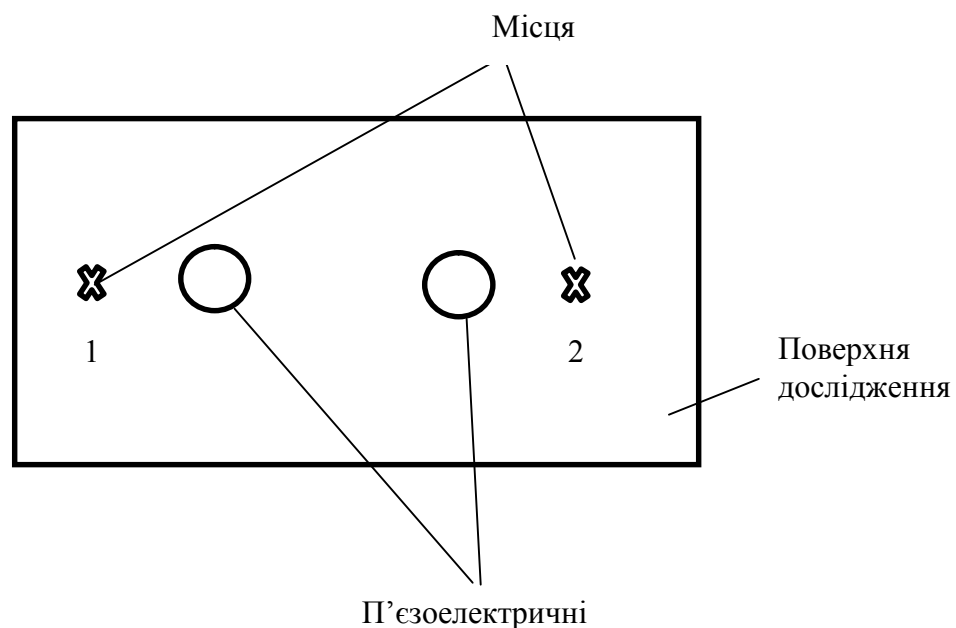


Рисунок 3.7 – Схема вимірювання швидкості розповсюдження акустичної хвилі

В таблицях 3.2 та 3.3 представлені результати вимірювання декременту затухання коливань, що отримані в результаті дослідження двох поверхонь в різних напрямках прозвучування.



Таблиця 3.2 – Результати вимірювання при дослідженні поверхні 1

	Напрямок прозвучування 1	Напрямок прозвучування 2
Дослід 1	0,024	0,031
Дослід 2	0,031	0,024
Дослід 3	0,031	0,031
Дослід 4	0,024	0,031
Дослід 5	0,031	0,024
Середнє значення	0,0282	0,0282

Після проведення математичної обробки результатів вимірювання були отримані середні квадратичні відхилення, що дорівнюють 0,000384 в обох напрямках. Випадкова похибка вимірювання декременту затухання коливань розраховується за формулою (3.4) та становить  $\Delta\lambda = 0,001$  для обох напрямків прозвучування.

Таблиця 3.3 – Результати вимірювання при дослідженні поверхні 2

	Напрямок прозвучування 1	Напрямок прозвучування 2
Дослід 1	0,025	0,032
Дослід 2	0,025	0,025
Дослід 3	0,025	0,032
Дослід 4	0,032	0,025
Дослід 5	0,025	0,025
Середнє значення	0,0264	0,0278

Після проведення математичної обробки результатів вимірювання були отримані середні квадратичні відхилення, що дорівнюють 0,00031 та 0,00038 в першому та другому напрямку прозвучування відповідно. Випадкова похибка вимірювання декременту затухання коливань та становить:

$\Delta\lambda = 0,0009$  – для першого напрямку прозвучування;

$\Delta\lambda = 0,001$  – для першого напрямку прозвучування

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

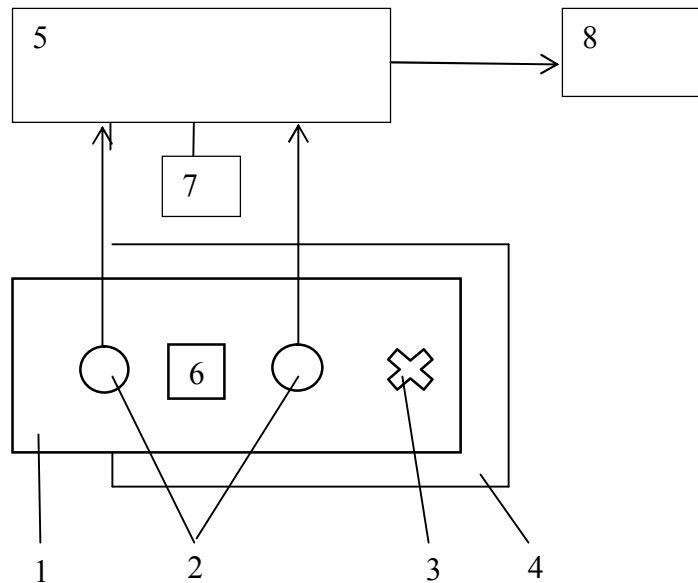
### 3.3 Методика дослідження залежності декременту затухання коливань в неметалевих гетерогенних матеріалах від механічного навантаження

Головним фактором, що впливає на зміну характеристик акустичних хвиль є змінення міжатомної відстані, тобто в кінцевому рахунку – деформація об'єкту контролю [126]. Розрахунок полів деформацій та механічної напруги вимагає знання виду відповідних функціональних залежностей. Необхідно також відмітити, що на розповсюдження пружних хвиль об'ємом матеріалу впливають теплові та електромагнітні зовнішні фактори, структурна анізотропія матеріалу об'єкта контролю, його передісторія, геометрія об'єкта та стан обмежуючих поверхонь, наявність пластичних деформацій та ін.

Швидкість пружної хвилі, яка розповсюджується в середовищі, залежить від механічних напружень, характеру поляризації хвилі, взаємного орієнтування хвильового вектору та напрямку дії зусилля.

Задачею дослідження є встановлення залежності декременту затухання коливань в зразках із синтеграну, що визначається швидкістю пружних хвиль, від прикладеного навантаження. Розглядається випадок однорідного стискання.

Вимірювання декременту затухання коливань проводилися ударним акустичним методом. Методика базується на залежностях (3.1) – (3.3). На рисунку 3.8 наведена схема вимірювання.



1 – об’єкт дослідження; 2 – ультразвукові п’єзоелектричні датчики; 3 – місце удару; 4 – пристрій навантаження (тиски); 5 – діагностичний стенд «Дельфін-1М»; 6 – тензорезистор; 7 – цифровий вимірювач деформації; 8 – персональний комп’ютер

Рисунок 3.8 – Схема вимірювання декременту затухання коливань

До складу стенду 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).

Вимірювання проводилися при трьох значеннях навантаження зразка площиною поверхні  $0,005625 \text{ м}^2$  (призма з довжиною ребра 75 мм) по п’ять вимірювань в кожному:

- при відсутності навантаження;
- при навантаженні 17,5 Н
- при навантаженні 35 Н.

Значення навантаження обиралися, виходячи з реально існуючих механічних напружень в синтеграні при використанні його в якості матеріалу для базових деталей верстатів.

Результати вимірювання наведені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Результати вимірювання декременту затухання коливань в синтеграні в різному навантаженому стані

Навантаження, Н	0	17,5	35
$\lambda$ , дослід 1	0,027	0,028	0,030
$\lambda$ , дослід 2	0,028	0,028	0,029
$\lambda$ , дослід 3	0,027	0,029	0,030
$\lambda$ , дослід 4	0,027	0,027	0,029
$\lambda$ , дослід 5	0,027	0,028	0,029
Середнє значення	0,0272	0,0280	0,0294
Стандартне відхилення	0,00045	0,00071	0,00055

Обробка результатів вимірювання була проведена при довірчій ймовірності 0,99. Випадкова похибка вимірювання розраховується за формулою (3.4) та становить:

$\Delta\lambda = 0,001$  – при вимірюваннях без навантаження;

$\Delta\lambda = 0,003$  – при вимірюваннях з навантаженням 17,5 Н;

$\Delta\lambda = 0,002$  – при вимірюваннях з навантаженням 35 Н

За результатами вимірювання можна відмітити, що декремент затухання коливань в синтеграні з ростом навантаження хоч і не суттєво, але зростає. На рисунку 3.9 представлена залежність вказаних величин.

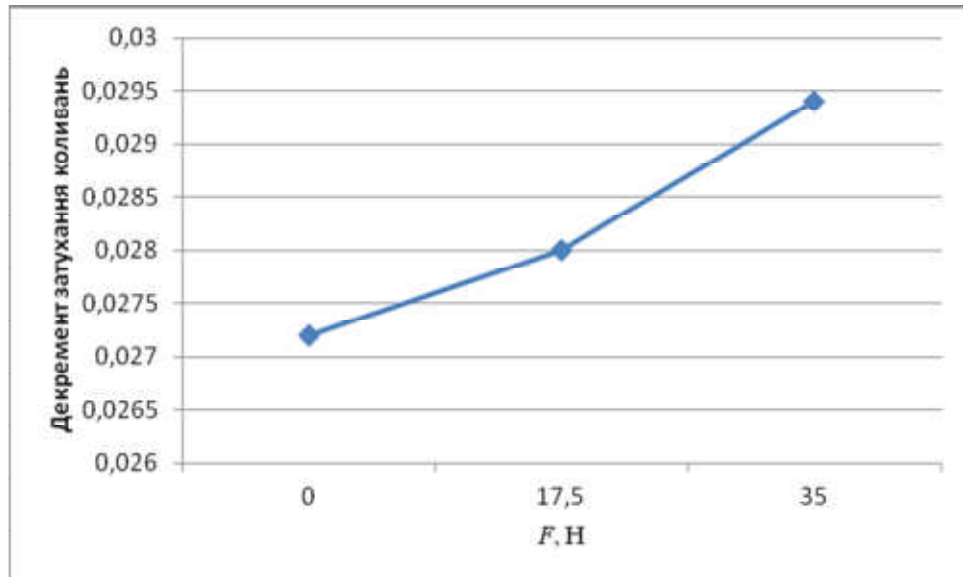


Рисунок 3.9 – Залежність декременту затухання коливань в синтеграні від навантаження

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

$$\lambda = 6 \cdot 10^{-5} \cdot F + 0.0272 , \quad (3.5)$$

де  $F$  – навантаження, Н.

#### 3.4 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.

З літературних джерел відомі частотні залежності модулю пружності матеріалів, а відповідно і швидкості пружних хвиль, що розповсюджуються в

них. Тому можна констатувати чутливість методу вимірювання декременту затухання коливань до змінення параметрів коливань об'єкту дослідження.

Метод базується на залежностях (3.1) – (3.3). При цьому необхідно фіксувати частоту вимушених коливань зразка та вимірювати швидкість пружних хвиль, що розповсюджуються в ньому після ударного навантаження.

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.

Вимірювання декременту затухання коливань проводяться ударним акустичним методом відповідно до методики, описаної в пункті 3.1. Відмінність складається в тому, що під час вимірювання зразок здійснює коливальний рух з частотою, що задається вібростолом. На рисунку 3.10 в якості прикладу наведені сигнали, отримані під час проведення випробувань за допомогою стенду «Дельфін-1М».

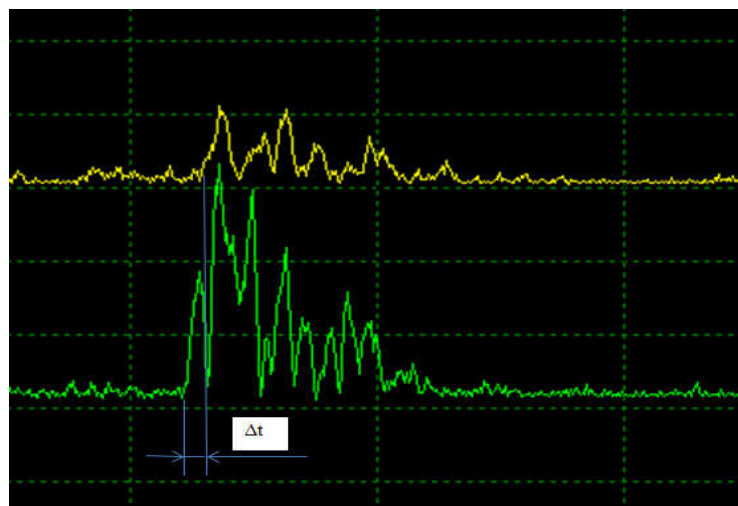


Рисунок 3.10 – Сигнали, отримані при дослідженні зразка синтеграну за допомогою діагностичного стенду «Дельфін-1М»

На рисунку сигнал, позначений зеленим кольором, — це сигнал, що був отриманий з датчика, який знаходився ближче до дочки удару. Крім часової затримки, що визначається швидкістю розповсюдження пружної хвилі,

спостерігається зменшення амплітуди сплеску приблизно в тричі. З рисунку видно, що в сигналах наявні шуми, які викликані коливаннями зразку. Тим не менш, вони не впливають значною мірою на точність вимірювання швидкості розповсюдження пружних хвиль.

Дослідження декременту затухання коливань проводилися на частотах 1750 Гц, 1800 Гц, 1850 Гц та 1920 Гц. На кожній частоті виконано по п'ять вимірювань. Результати наведені в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Результати вимірювання декременту затухання коливань  $\lambda$  в синтеграні на різних частотах

Частота коливань, Гц	1750	1800	1850	1920
$\lambda$ , дослід 1	0,025	0,026	0,028	0,029
$\lambda$ , дослід 2	0,025	0,026	0,028	0,030
$\lambda$ , дослід 3	0,026	0,027	0,029	0,031
$\lambda$ , дослід 4	0,026	0,027	0,029	0,028
$\lambda$ , дослід 5	0,026	0,027	0,028	0,030
Середнє значення	0,0256	0,0266	0,0284	0,0296
Стандартне відхилення	0,00055	0,00055	0,00055	0,00114

Обробка результатів вимірювання була проведена при довірчій ймовірності 0,99. Випадкова похибка вимірювання розраховується за формулою (3.4) та становить:

$\Delta\lambda = 0,002$  – при вимірюваннях з частотою вимушених коливань 1750 Гц, 1800 Гц та 1850 Гц;

$\Delta\lambda = 0,003$  – при вимірюваннях з частотою вимушених коливань 1920 Гц.

З результатів вимірювання видно, що декремент затухання коливань збільшується з ростом частоти коливань зразка. На рисунку 3.11 представлена залежність вказаних величин.



Рисунок 3.11 – Залежність декременту затухання коливань від частоти

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

$$\lambda = 2,35 \cdot 10^{-5} f - 0,0155 , \quad (3.6)$$

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

### 3.5 Висновки

- Встановлена залежність дисипативних властивостей від модуля пружності матеріалу.
- Отримана залежність декременту затухання коливань та швидкості розповсюдження пружних хвиль в синтеграні.
- Розроблений метод вимірювання дисипативних властивостей неметалевих гетерогенних матеріалах, що заснований на визначенні швидкості розповсюдження пружної хвилі в матеріалі та дозволяє визначати дисипативні властивості матеріалу в різних напрямках розповсюдження акустичних хвиль, що є особливо важливим для неоднорідних матеріалів.



– Показано, що метод може використовуватися не тільки для визначення дисипативних властивостей зразків матеріалу, але і при дослідженні характеристик розсіювання енергії в готових виробах.

– Доведена можливість дослідження запропонованим методом залежностей характеристик розсіювання енергії від навантаження та частоти вимушених коливань дослідного зразка.

– Отримані залежності декременту затухання коливань в синтеграні від навантаження та частоти, що враховують фізико-механічні властивості матеріалу.

## РОЗДІЛ 4

### ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ВИКОРИСТАННЯ ЗАПРОПОНОВАНОГО МЕТОДА

4.1 Структурна схема та галузь використання запропонованого метода вимірювання

#### 4.1.1 Структурна схема метода вимірювання

На основі описаних у попередніх розділах принципів була запропонована загальна система, що призначена для визначення дисипативних властивостей неметалевих гетерогенних матеріалів та базується на акустичному ударному методі вимірювання.

На рисунку 4.1 наведена структурна схема вимірювальної системи, яка призначена для вимірювання декременту затухання коливань в неметалевих гетерогенних матеріалах.

Система складається з наступних підсистем:

- об'єкт дослідження;
- первинні перетворювачі – п'єзоелектричні ультразвукові датчики;
- електронний блок діагностичного стенду «Дельфін-1М»;
- персональний комп'ютер;
- математична модель для розрахунків характеристик розсіювання енергії в неметалевих гетерогенних матеріалах, що відображає зв'язок швидкості розповсюдження пружних хвиль та декременту затухання коливань

#### 4.1.2 Використання запропонованого метода в рамках САПР

На етапі автоматизованого проектування об'єкта ще не існує та вимірювання дисипативних властивостей неметалевих гетерогенних матеріалів може бути здійснено лише на лабораторних зразках.



Рисунок 4.1 – Структурна схема вимірювальної системи для визначення декременту затухання коливаний в неметалевих гетерогенних матеріалах

Не зважаючи на це, користь від використання запропонованої системи вимірювання на цьому етапі життєвого циклу виробів з неметалевих гетерогенних матеріалів доволі велика, оскільки розрахунки параметрів дисипації будуть значно відрізнятися від реальних характеристик розсіювання енергії. Це викликано такими причинами:

- компоненти неметалевих гетерогенних матеріалів суттєво відрізняються один від одного за дисипативними властивостями, а їхній розподіл об'ємом виробу, від якого залежить ефективне значення декременту затухання коливань, складно передбачити;
- вібростійкість виробів з неметалевих гетерогенних матеріалів визначається не лише дисипативними властивостями матеріалів, але, значною мірою, залежить від особливостей закладних та способу їхнього монтажу.

Це призводить до необхідності лабораторного тестування прийнятих проектних рішень. Структурна схема системи автоматизованого проектування конструкцій з неметалевих гетерогенних матеріалів наведена на рисунку 4.2.

#### 4.1.3 Використання запропонованого метода в рамках АСУ

В рамках АСУ система вимірювання дисипативних властивостей неметалевих гетерогенних матеріалів вбудовується окремою ланкою в загальну систему автоматизованого управління.

Управління ведеться за декрементом затухання коливань, що вимірюється відповідно до методики, наведеної в розділі 3.1. Система вимірювання допомагає АСУ реагувати на невідповідність дисипативних властивостей конструкції вимогам, що викликана, наприклад нерівномірністю розподілу фракцій об'ємом відливків або появою інших дефектів.

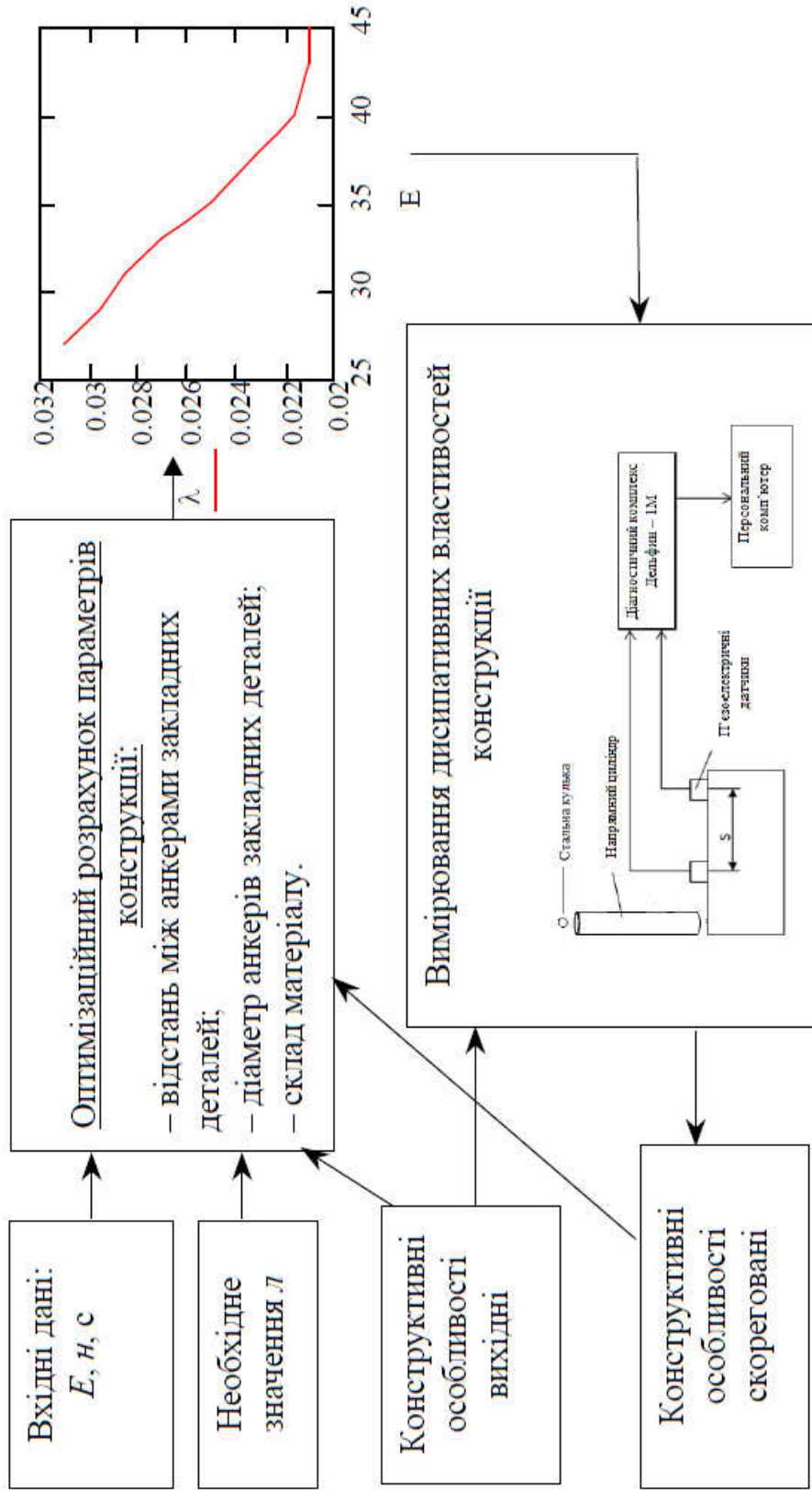


Рисунок 4.2 – Структурна схема САПР корпусних деталей із синтеграну.

Забезпечуючи зворотній зв'язок з вхідними параметрами технології виготовлення, система відновлює контрольоване значення декременту затухання коливань виробів.

Структурна схема автоматизованої системи управління виготовленням виробів з неметалевих гетерогенних матеріалів наведена на рисунку 4.3.

#### 4.2 Дослідження метрологічних характеристик метода вимірювання дисипативних властивостей неметалевих гетерогенних матеріалів

Розходження значень характеристик демпфування, визначених різними методами для того ж самого зразка матеріалу, викликана не тільки різними припущеннями щодо характеру дисипативних сил, але і залежністю точності та чутливості використаних експериментальних методів від значення вимірюваної величини [1].

Така залежність призводить до існування ефективної області використання метода вимірювання, в якому для конкретного матеріалу або елемента конструкції можна отримати максимально достовірні характеристики розсіювання енергії.

##### 4.2.1 Чутливість метода вимірювання

Чутливість метода вимірювання – це відношення змінення сигналу на виході методу до змінення вимірювальної величини. Поняття чутливості може визначатися передаточною функцією, як функцією відношення сигналів на вході та на виході.

При оцінюванні метрологічних характеристик акустичного метода вимірювання дисипативних властивостей неметалевих гетерогенних матеріалів основним інформативним параметром є  $C$  – швидкість розповсюдження

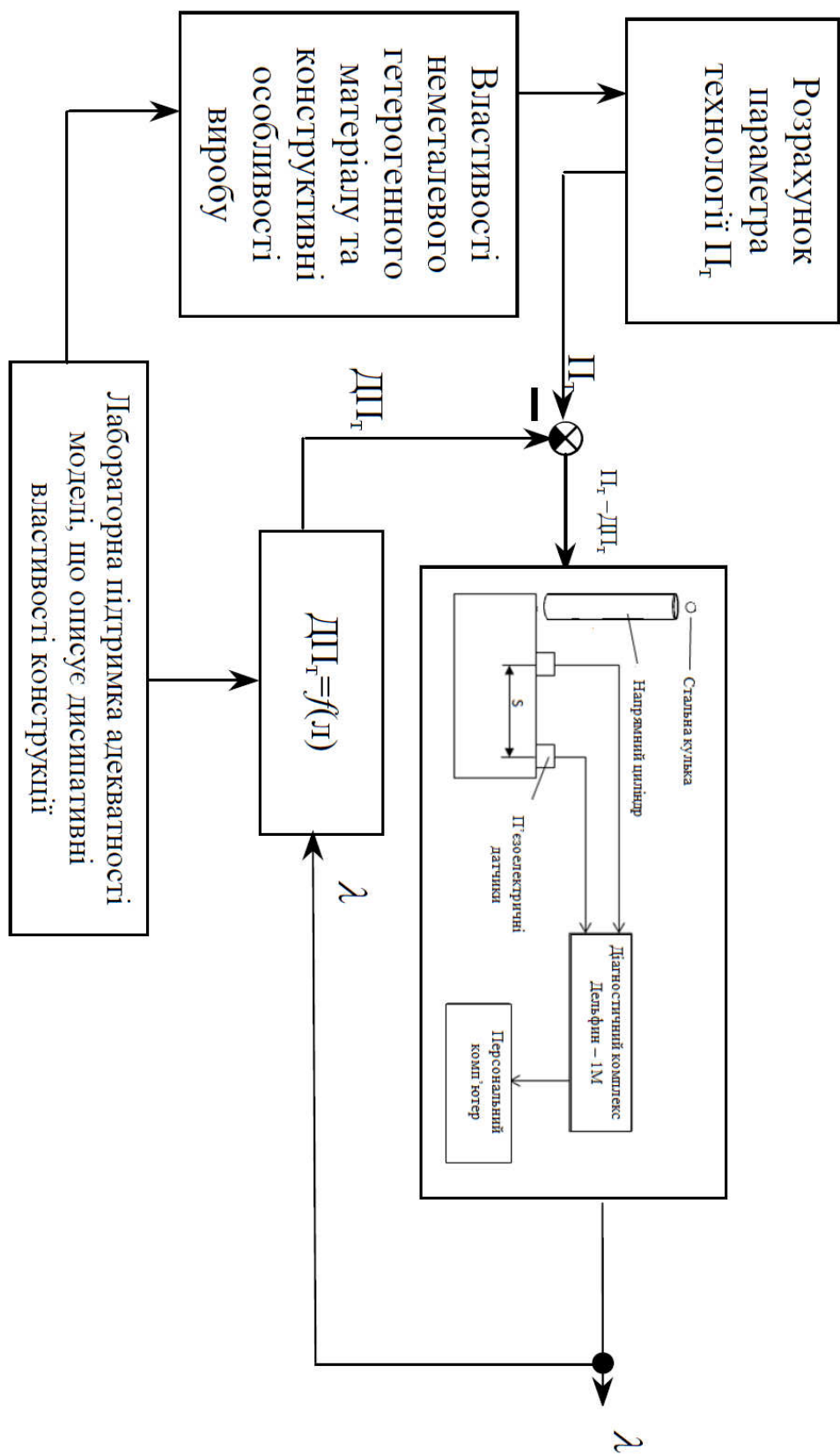


Рисунок 4.3 – Структурна схема АСУ виробництва корпусних деталей із синтеграну.

поперечної пружної хвилі, тобто чутливість метода буде визначатися по відношенню до  $C$ . На виході методу – декремент затухання коливань в неметалевому гетерогенному матеріалі  $\lambda$ .

В залежності від виду функції чутливість може бути як постійною величиною, так і величиною, що залежить від значення вимірюваної величини. На рисунку 4.4 наведена градувальна характеристика запропонованого метода вимірювання дисипативних властивостей неметалевих гетерогенних матеріалів.

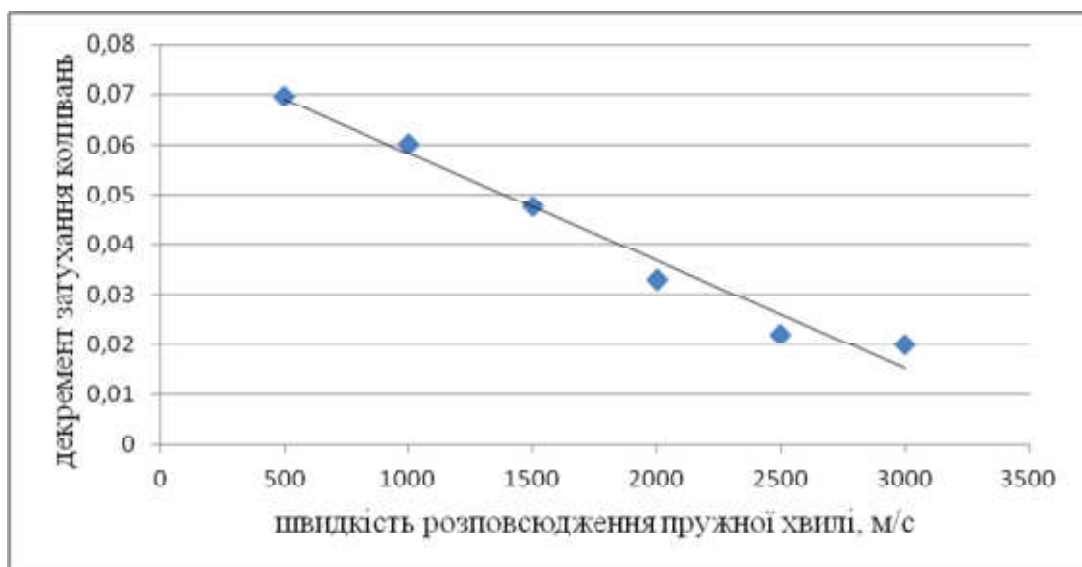


Рисунок 4.4 – Градувальна характеристика метода

Використовуючи отримані залежності, наведені на рисунку 4.4 можна визначити середню чутливість метода вимірювання як відношення

$$S = \frac{\Delta\lambda}{\Delta C} , \quad (4.1)$$

де  $S$  – чутливість метода вимірювання дисипативних властивостей неметалевому гетерогенного матеріалу,  $(\text{м/с})^{-1}$ ;

$\Delta\lambda$  – змінення декременту затухання коливань;

$\Delta C$  – змінення швидкості розповсюдження пружної поперечної хвилі, м/с.



$$S = 0.00002 \frac{1}{\text{м/с}}$$

#### 4.2.2 Дослідження точності метода

Точність засобу вимірювальної техніки є властивістю засобу вимірювальної техніки, що відображає близькість до нуля його похибок [149-154]. Розглянемо цей метрологічний показник акустичного метода вимірювання дисипативних властивостей неметалевих гетерогенних матеріалів більш детально.

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.4.5).



Рисунок 4.5 – Блок-схема перетворень вимірюваної величини в акустичному методі вимірювання дисипативних властивостей неметалевих гетерогенних матеріалів

Це, як відомо [155, 156] призводить до накоплення похибки вимірювання на кожному етапі перетворень. Розрахуємо систематичну похибку опосередкованого вимірювання декременту затухання коливань для першого зразка.

За допомогою прямих вимірювань були отримані значення модуля пружності  $E = 25$  ГПа, коефіцієнту Пуассона  $\nu = 0,26$ , база прозвучування  $S = 263$  мм, різниця в часі сигналів від віброакустичних датчиків  $t = 132$  мкс. Випробовувалися зразки правильної форми, тому щільність визначалася за допомогою опосередкованих вимірювань як відношення маси зразка до його об'єму. Результат вимірювання щільності склав:  $\rho = 2500$  кг/м<sup>3</sup>. Отримали таке значення декременту затухання коливань:  $\lambda = 0,027$

Для опосередкованих вимірювань абсолютна похибка вимірювання визначається формулою:

$$\Delta f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 \cdot \Delta x^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 \cdot \Delta y^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 \cdot \Delta z^2 + \dots}, \quad (4.1)$$

де  $\Delta f$  – 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  $x, y, z$ .

Швидкість пружних хвиль визначалася за формулою (3.3).

$C = 1879$  м/с.

При вимірюванні довжини бази прозвучування за допомогою штангенциркуля абсолютна похибка вимірювання складає  $\Delta l = \pm 0,1$  мм. Відносну похибку обчислюємо за формулою:

$$\delta x = \frac{\Delta x}{x} \cdot 100\% . \quad (4.2)$$

Тоді  $\delta l = 0.04 \%$ .

Для діагностичного комплексу «Дельфін-1М» на використовуваних каналах апаратурний фазовий зсув набагато менше ніж  $1^\circ/\text{Гц}$  та ним можна знехтувати. Тому похибка вимірювання часу буде визначатися лише похибкою квантування, яка не перевищує половини кроку квантування (при округленні до найближчого числа). Крок квантування по вісі часу  $q = 3.5$  мкс. Тому:

$$\Delta t = \Delta_{кв} = \frac{q}{2} = \frac{3.5}{2} = \pm 1.75 \text{ мкс} . \quad (4.3)$$

Запишемо у відносній формі:  $\delta t = 1,3 \%$ .

Розглянемо похибку опосередкованого вимірювання щільності. При похибці вимірювання маси  $\Delta m = \pm 0,5$  г та похибці вимірювання лінійних розмірів зразка  $\pm 0,1$  мм (вимірювання штангенінструментом) відносна похибка не перевищить  $2 \%$ . Розрахуємо абсолютну похибку вимірювання за формулою (4.2).

$$\Delta \rho = \frac{2500 \cdot 2}{100} = \pm 50 \text{ кг/м}^3.$$

Відносна похибка вимірювання коефіцієнту Пуассона  $0,5 \%$ . Запишемо в абсолютних величинах:  $\Delta \nu = \pm 0,001$ .

Відносна похибка опосередкованих вимірювань визначається за формулою:

$$\delta f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 \cdot \delta x^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 \cdot \delta y^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 \cdot \delta z^2 + \dots}, \quad (4.4)$$

де  $\delta f$  – 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  $x, y, z$ .

Визначимо похибку опосередкованих вимірювання швидкості пружних хвиль в синтеграні  $\Delta C$ :

$$\delta C = \sqrt{(-\delta t)^2 + (\delta l)^2} . \quad (4.5)$$

$$\delta C = \sqrt{1,3^2 + 0,04^2} \approx 1.3 \%$$

Тоді абсолютна похибка визначення швидкості розповсюдження пружних хвиль в синтеграні за формулою (4.2) буде складати:

$$\Delta C = \frac{1879 \cdot 1.3}{100} = \pm 24 \text{ м/с.}$$

З формули (2.14) знайдемо модуль пружності  $E$ .

$$E = 2\rho C^2(1 + \nu)$$

У відповідності до формули (4.2) абсолютна похибка визначення модуля пружності буде розраховуватися так:

$$\Delta E = \sqrt{\left(\frac{\partial E}{\partial \rho}\right)^2 \cdot \Delta \rho^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial \nu}\right)^2 \cdot \Delta \nu^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial C}\right)^2 \cdot \Delta C^2} . \quad (4.6)$$

Взявши частинні похідні, отримуємо таку залежність:

$$\Delta E = \sqrt{(2 \cdot C^2 \cdot [1 + \nu])^2 \cdot \Delta \rho^2 + (2 \cdot C^2 \cdot \rho)^2 \cdot \Delta \nu^2 + (4 \cdot C \cdot \rho \cdot [1 + \nu])^2 \cdot \Delta C^2} . \quad (4.7)$$

Підставивши значення, отримуємо:

$$\Delta E = \pm 228 \cdot 10^6 \text{ Па} \approx \pm 0,2 \text{ ГПа.}$$

За формулою (4.2) розрахуємо відносну похибку вимірювання модуля пружності:

$$\delta E = \frac{0,2}{25} \cdot 100 = 0,8 \text{ \%}.$$

Знайдемо похибку опосередкованих вимірювань декремента затухання коливань. У відповідності до формули (4.1) абсолютна похибка розраховується так:

$$\Delta \lambda = \sqrt{\left(\frac{\partial \lambda}{\partial E}\right)^2 \cdot \Delta E^2} \quad (4.8)$$

Взявши частинні похідні, отримуємо таку залежність:

$$\Delta \lambda = \sqrt{(0,0004152 \cdot E + 2,109 \cdot 10^{-3})^2 \cdot \Delta E^2} \quad (4.9)$$

Підставивши значення, отримуємо:

$$\Delta \lambda_{\text{сист}} = \pm 0,002$$

У відносні формі основна систематична похибка метода вимірювання складає:  $\delta \lambda_{\text{сист}} = \pm 7,4 \text{ \%}$

Така сумарна максимально можлива похибка (якщо показники похибок усіх перетворювань випадково виявляться максимальними з один знаком) цілком допустима (до 20%) в сфері акустичних вимірювань.

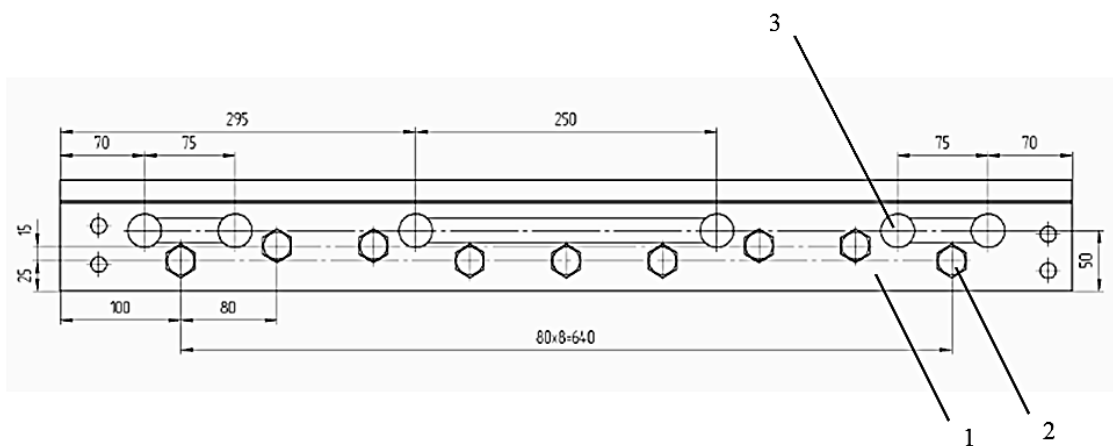
#### 4.3 Виробничі випробування та практичні результати досліджень

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. Досліджувалася залежність дисипативних характеристик базових деталей верстатів із синтеграну від конструкції закладних та способу їхнього монтажу.

Такі деталі монолітно закладаються в синтегран. В якості анкерних кріплень найбільш часто використовується стрижнева арматура періодичного профілю. Оскільки відповідальні закладні деталі в основному виробляються із чавуна, то стрижнева арматура сполучається з такими деталями різьбовим з'єднанням.

Ребра жорсткості закладних деталей також проектується з крупними отворами, вважаючи, що вони покращать якість закладення ребер в синтегран, а відповідно і підвищать характеристики розсіювання енергії в базових деталях верстатів. Для перевірки справедливості цього твердження були проведені спеціальні дослідження. На рисунку 4.6 наведений зовнішній вид закладної деталі.



1 – планка; 2 – анкери; 3 – отвори для закріплення напрямної

Рисунок 4.6 – Зовнішній вигляд закладної деталі

Планка, на яку в подальшому буде встановлюватися напрямна, являє собою чавунну пластину довжиною 840 мм та перетином  $90 \times 30$  мм, на якій розташовані анкери у вигляді стрижневої арматури періодичного профілю та ребер жорсткості. Конструкції анкерів були такими:

- 1) гладкі ребра без отворів довжиною 200 мм, виготовлені з сталі марки Ст. 3 перетином  $200 \times 5$  мм;
- 2) гладкі ребра довжиною 200 мм, перетином  $200 \times 5$  мм, з двома отворами діаметром 70 мм в середньому перетині за висотою ребра, виготовлені з сталі марки Ст. 3;
- 3) арматура періодичного профілю діаметром 16 мм та довжиною 200 мм;
- 4) гладкі ребра без отворів з привареними до них анкерами з арматури періодичного профілю;
- 5) гладкі ребра з двома отворами діаметром 70 мм в середньому перетині за висотою ребра з привареними до них анкерами з арматури періодичного профілю;

При заливанні синтегранового зразка закладні деталі встановлювалися на дно опалубки.

В ході випробувань досліджувалася залежність дисипативних властивостей конструкції від кількості анкерів. При цьому використовувалися зразки, в яких закладні деталі мали 3, 5, 7, 9 та 11 анкерів.

В зразках проводилися вимірювання декременту затухання коливань ударним акустичним методом. П'єзоакустичні датчики розташовувалися безпосередньо біля закладної деталі. По поверхні завдавався удар. Місце удару розташовувалося на одній прямій з датчиками. Під час досліджень характеристик розсіювання енергії проводилися вимірювання швидкості розповсюдження поперечних пружних хвиль у відповідності до методики, наведеної в пункті 3.1. За формулою (3.2) розраховувався декремент затухання коливань.

В таблиці 4.1 наведені середні значення п'яти результатів вимірювання декременту затухання коливань для кожного із зразків, що мають різні конструкції анкерів закладних деталей та їх кількість.

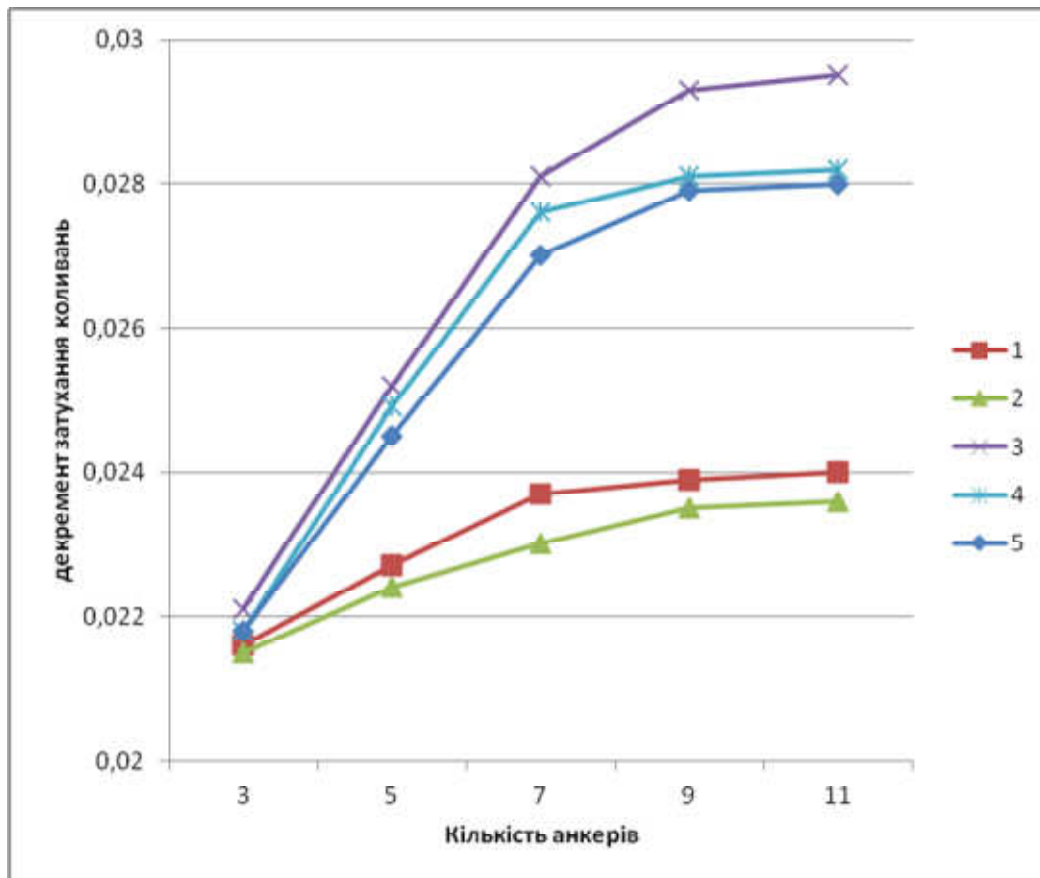
Таблиця 4.1 – Результати вимірювання декременту затухання коливань в синтегранових зразках в залежності від конструкції та кількості анкерів

Конструкція анкерів	Кількість анкерів				
	3	5	7	9	11
1. Гладкі ребра без отворів	0,0216	0,0227	0,0237	0,0239	0,024
2. Гладкі ребра з отворами	0,0215	0,0224	0,023	0,0235	0,0236
3. Арматура періодичного профілю	0,0221	0,0252	0,0281	0,0293	0,0295
4. Гладкі ребра без отворів з привареними до них анкерами з арматури періодичного профілю	0,0218	0,0249	0,0276	0,0281	0,0282
5. Гладкі ребра з отворами з привареними до них анкерами з арматури періодичного профілю	0,0218	0,0245	0,0270	0,0279	0,028

На рисунку 4.7 наведена залежність декременту затухання коливань в зразках синтеграну від кількості анкерів закладних деталей для різних конструкцій анкерів.

Дослідження показали, що найбільший декремент затухання коливань мають зразки, в яких в якості анкерів використовується арматура періодичного профілю, найменший декремент затухання коливань у зразків, в яких в якості анкерів – гладкі ребра з отворами. На наш погляд це пов'язано з тим, що поверхня зчеплення ребер з отворами на 20 % менше, ніж у гладких ребер без отворів. Відповідно, знижується жорсткість їх закладання в синтегран.





1 – гладкі ребра без отворів; 2 – гладкі ребра з отворами; 3 – арматура періодичного профілю; 4 – гладкі ребра без отворів з привареними до них анкерами з арматури періодичного профілю; 5 – гладкі ребра з отворами з привареними до них анкерами з арматури періодичного профілю

Рисунок 4.7 – Залежність декременту затухання коливань в зразках синтеграну від кількості анкерів закладних деталей

Декремент затухання коливань в зразках, в яких в якості анкерів використовувалися арматура з періодичним профілем порівняно із зразками, де анкерами слугували гладкі ребра, був на 26 % більше, в той час, коли поверхня зчеплення – 2,1 раз менше. Таким чином, дослідження показали, що використання ребер з великими отворами є недоцільним.

В результаті приварювання до кінця ребер стрижнів з арматури періодичного профілю, підвищується декремент затухання коливань за рахунок збільшення жорсткості зчеплення із синтеграном.

Стосовно впливу кількості анкерів закладних деталей на декремент затухання коливань досліджуваних зразків можна відмітити наступне: при її збільшенні декремент затухання коливань збільшується для всіх конструкцій анкерів. Причому, починаючи з дев'яти анкерів кут нахилу залежності декременту затухання коливань від кількості анкерів стає значно меншим для всіх досліджуваних зразків, що свідчить про недоцільність використання більшої кількості анкерів.

На зчеплення анкерів з арматури періодичного профілю з синтеграном, а, відповідно і на динамічні властивості конструкції, впливає також діаметр стрижнів. Були проведені відповідні дослідження. В зразках, які представляють собою синтегран із закладними деталями у вигляді планки із закріпленими на ній анкерами з арматури періодичного профілю (рис. 4.4) діаметром 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, проводилися вимірювання декременту затухання коливань ударним ультразвуковим методом. В таблиці 4.2 наведені середні значення п'яти результатів вимірювань для кожного із зразків.

Таблиця 4.2 – Результати вимірювання декременту затухання коливань в синтегранових зразках в залежності від діаметрів анкерів

Номінальний діаметр стрижнів арматури, мм	Декремент затухання коливань	Номінальний діаметр стрижнів арматури, мм	Декремент затухання коливань
8	0,0244	16	0,0293
10	0,0261	18	0,0295
12	0,0276	20	0,0296
14	0,0285	22	0,0297

На рисунку 4.8 наведена залежність декременту затухання коливань в зразках із синтеграну від номінального діаметру анкерів закладних деталей у вигляді стрижнів арматури періодичного профілю.

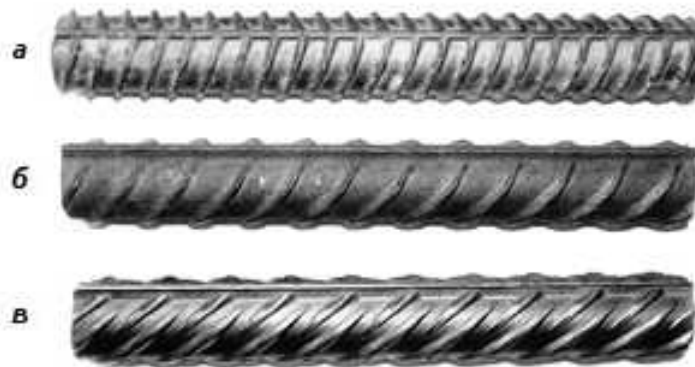


Рисунок 4.8 – Залежність декременту затухання коливань в зразках із синтеграну від номінального діаметру анкерів закладних деталей у вигляді стрижнів арматури періодичного профілю

З рисунка видно, що починаючи з діаметру стрижнів арматури, що дорівнює 16 мм кут нахилу залежності декременту затухання коливань від діаметру анкерів стає значно меншим, що свідчить про недоцільність використання більших діаметрів анкерів в досліджуваних конструкціях. Необхідно відмітити, що дослідні значення декременту затухання коливань для зразків з анкерами діаметром 16 мм були приблизно в 1,2 рази більше, ніж для зразків з арматурою діаметром 8 мм. Тобто співвідношення величин декрементів затухання коливань в цих межах складає приблизно 60 % від співвідношення діаметрів арматури.

Ще одним фактором, що значною мірою впливає на зчеплення анкерів закладних деталей у вигляді арматури періодичного профілю з синтеграном а отже і на характеристики розсіювання енергії коливань в конструкції є форма

перетину арматури. На рисунку 4.9 наведені основні види профілю арматури, що використовується в якості анкерів для закладних.



а – кільцевий профіль; б – серпоподібний профіль; в – змішаний профіль

Рисунок 4.9 – Види профілю арматури

Проведені дослідження впливу форми перетину арматури для анкерів закладних деталей на дисипативні властивості конструкції. На рисунку 4.10 наведені середні значення п'яти результатів вимірювання декременту затухання коливань в кожному із зразків синтеграну із закладними деталями, що представляють собою планку з анкерами (рис. 4.6) у вигляді арматури з періодичним профілем з різною формою перетину.

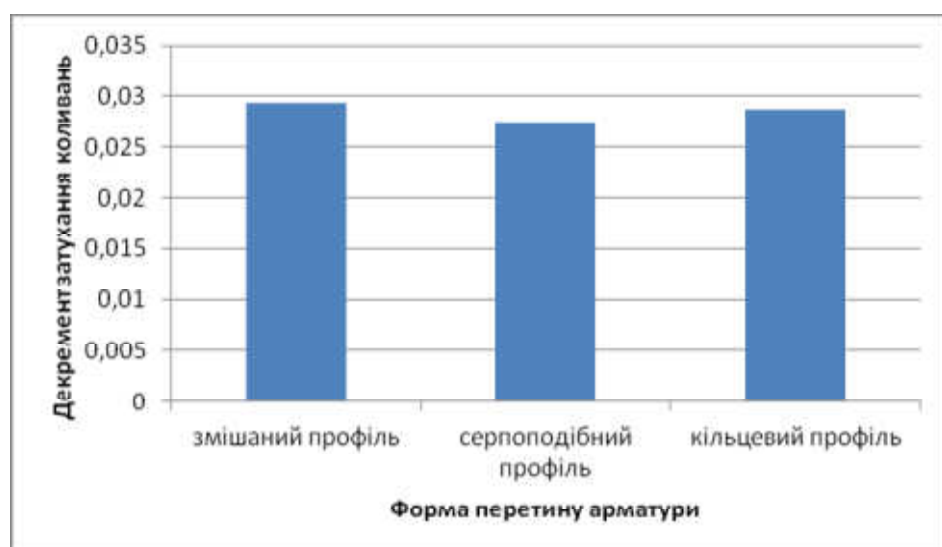


Рисунок 4.10 – Декремент затухання коливань дослідних зразків з різним видом профілю анкерів закладних деталей

З рисунка видно незначні відмінності в характеристиках розсіювання енергії коливань в різних зразках. Причому, найкращі дисипативні властивості мають зразки із синтеграну, в яких в якості анкерів закладних деталей використана арматура з змішаним профілем. Найгірші результати показали зразки, де в якості анкерів використана арматура із серпоподібним профілем.

#### 4.4 Висновки

– Запропонована вимірювальна система, що призначена для визначення дисипативних властивостей неметалевих гетерогенних матеріалів та базується на акустичному ударному методі вимірювання;

– Показана користь від використання запропонованої системи вимірювання на етапі автоматизованого проектування виробів з неметалевих гетерогенних матеріалів та рамках автоматизованої системи управління виробництвом виробів з неметалевих гетерогенних матеріалів.

– Проведені дослідження метрологічних характеристик метода вимірювання. 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. Розрахована систематична похибка метода вимірювання, яка складає  $\pm 7,4 \%$ , що є цілком допустимим в сфері акустичних вимірювань (до 20%). Визначена середня чутливість запропонованого метода вимірювання, яка розраховується як відношення змінення швидкості розповсюдження пружної поперечної хвилі до змінення декременту затухання коливань та складає  $0,00002 \text{ (м/с)}^{-1}$ .

– Проведені виробничі випробування результатів досліджень. Вимірюванням підлягав декремент затухання коливань в зразках із синтеграну із закладними деталями різних конструкцій. В результаті було встановлено, що 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.

## 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.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Пелех Б.Л. Экспериментальные методы исследования динамических свойств композиционных структур / Б.Л. Пелех, Б.И. Саляк; Отв. ред. В.В. Васильев; АН УССР Ин-т прикладных проблем механики и математики. – Киев: Наук. думка, 1990. – 136 с. – ISBN 5-12-0011312-0.

2. Мельничук П.П. Сучасні матеріали у верстатобудуванні / П.П. Мельничук, В.Ю. Лоев, В.Г. Сніцар, С.А. Клименко // Вісник ЖДТУ, 2010, №1 (52). – С. 38-50

3. Тонконогий, В.М. Применение синтеграна 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 Ulrish's Periodicals Directory (New Jersey, USA).*

4. Барт В.Е. Опыт применения синтеграна в машиностроении / В.Е. Барт, Г.С. Санина, С.А. Шевчук // Станки и инструмент, 1993. №1. – С. 15 – 17.

5. Фролов К.В. Энциклопедия в сорока томах. Том IV-7. Металлорежущие станки и деревообрабатывающее оборудование. / К.В. Фролов. – М: Издательство: Машиностроение. 2002. – 864 с.

6. Рогов В.А., Разработка изделий из синтеграна для машиностроения / В.А. Рогов. – М.: Геотехника 2001. – 228 с.

7. Кешапава М.Я. Исследование эффективности использования станины из синтеграна на отделочно-расточных станках / М.Я. Кешапава // Станки и инструмент. 1993. №1. – С. 20-23

8. Кирилин Ю.В. Применение синтеграна для изготовления базовых деталей тяжелых фрезерных станков / Ю.В. Кирилин, Д.А. Титов // Станки и инструмент. 1993. №1. – С. 18-19

9. Матеріали фірми ХК «Мікрон» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.micron.ua/ru/products/mill>

10. ЭНИМС [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.enims.ru/>
11. Барт В.Е. Применение полимербетонов в станкостроении / В.Е. Барт, Г.С. Санина, С.А. Шевчук– М. ВНИИТЭМР, 1987. – 40 с.
12. Санина Г.С. Эпоксидные связующие материалы для изготовления базовых деталей из синтеграна / Г.С. Санина, В.Е. Барт, Ж.П. Коряковская, А.И. Филиппова // Станки и инструмент, 1993. №1. – 31 с.
13. Оссам Мохамед Ерфан Ахмед. Снижение виброактивности корпусных деталей металлорежущих станков путем применения композиционных материалов (синтеграна): Дис. ... канд. техн. Наук. Москва. 2004. – 164 с.
14. Рогов В.А. Новые материалы в машиностроении: Учеб. пособие. / В.А. Рогов, В.В. Соловьев, В.В. Копылов. – М.: РУДН, 2008. – 324 с.
15. Васильев В.В. Композиционные материалы. Справочник / В.В. Васильев, В.Д. Протасов. – М.: Машиностроение, 1990. – 685 с.
16. Аскинази А.Е. Токарные станки на международных выставках 90-х гг. / А.Е. Аскинази, Б.И. Черпаков // Станки и инструмент, 1998. №7. – С. 27-32
17. Матеріали фірми boehringер [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.boehringер-stankи.ru/stankи\\_ng.html](http://www.boehringер-stankи.ru/stankи_ng.html)
18. Матеріали фірми emag [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.emag.com/ru/kompanija.html>
19. Матеріали компанії Prima Power [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.primapower.com/ru/products/thelaser/>
20. Позняк Г.Г. Исследование резцов с синтеграновыми вставками / Г.Г. Позняк, В.Е.Барт, В.А. Рогов // Станки и инструмент, 1993. №1. – С. 29-31
21. Белов П.С. Изменение значений собственных частот колебаний расточных резцов в зависимости от внедрения в их державку вставок из высоконаполненного композиционного материала / П.С. Белов // XIX

Туполевские чтения: Международная молодежная научная конференция, 24-26 мая 2011 года: Материалы конференции. Том II. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та. 2011. – С. 91-93

22. Алиев Ф.А., и др. Оптимизация линейных инвариантных во времени систем управления / Ф.А. Алиев. – Киев, Наукова Думка, 1978. – 327 с.

23. Ефимов В.Н. Тенденции в развитии станкоинструментальной отрасли по результатам выставки ЕМО 99. / В.Н. Ефимов, С.В. Васильев // ИТО, №2, 1999. С. 8-10.

24. Барт В.Е. Разработка синтеграна для станкостроения и технологии изготовления из него деталей станков в условиях опытного производства. Отчет по теме 12-84 / В.Е. Барт, С.А. Шевчук, и др. – М.: НПО. ЭНИМС, 1985. – 51 с.

25. Кудинов В.А. Контроль качества станочных деталей из синтеграна с использованием неразрушающих методов / В.А. Кудинов, Д.З. Зонов // Станки и инструмент. 1993. №1. – С. 23-29

26. Матис И.Г. Методы и средства контроля качества композитных материалов / И.Г. Матис // Дефектоскопия – 1991. - №4. - с. 77-87.

27. Потапов А.И. Контроль качества и прогнозирование надежности конструкций из композиционных материалов / А.И. Потапов – Л.: Машиностроение, 1980. – 261 с., ил. – (Межиздательская серия «Надежность и качество»).

28. Забашта В.Ф. Полимерные композиционные материалы конструкционного назначения / В.Ф. Забашта, Г.О. Кривов, В.Г. Бондар. – К.; Техника, 1993. – 160 с.

29. Lewis Glifford. The role of testing in development of advanced materials. – Mater. Eng., 1988, 105, № 5, p, 40-42

30. Басов Н.И. и др. Контроль качества полимерных материалов / Н.И. Басов, В.А. Любартович, С.А. Любартович; Под ред. В.А. Брагинского. 2-е изд., перераб. – Л.: Химия, 1990. – 112 с. Ил

31. Тонконогий В.М. Определение допуска на угол преломления ультразвукового луча при исследовании параметров качества изделий из синтеграна / 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*

32. Тонконогий В.М. Составление бюджета неопределенностей при ультразвуковом методе контроля качества изделий из синтеграна / 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.*

33. Голофеева М.А. Акустический метод контроля синтеграновых изделий // Проблемы техники: научно-виробничий журнал, - Одеса. – 2013. - №3 – С. 119-124.

34. 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.

35. 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. Васильченко И.П., Пелех Б.Л. Основы электромагнитного метода исследования напряжений в анизотропных средах – Киев: Наук. думка, 1980. – с. 116

36. 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

37. Голофеева М.А. Акустические методы исследования параметров качества деталей из синтеграна // «Оралды ғылым жаршысы» Уральский

научный вестник. Серия Технические науки. Физика. Экология. - № 10(58) – г. Уральск – 2013 – с. 15-18

38. Голофеева М.А. Показатели качества полимерных композиционных материалов и методы их контроля // «Оралды ғылым жаршысы» («Уральский научный вестник»), Серия Технические науки. Экология. - г. Уральск. - № 18(66) – 2013 – с. 23-27

39. 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

40. 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

41. 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

42. 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

43. 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

44. 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

45. Rose J.L. Ultrasonic wave propagation principles in composite material inspection. – Mater. Evaluation, 1985, 43, № 5, p. 481-483

46. Гимельфарб Ф.А. Современные методы контроля композиционных материалов / Ф.А. Гимельфарб, С.Л. Шварцман. – М.: Металлургия, 1979. – 248 с.

47. Вознесенский В.А. Современные методы оптимизации композиционных материалов / В.А. Вознесенский, В.Н. Выровой, В.Я. Керш и др.. – Киев: Будівельник. 1983. – 144 с.

48. A. Salih Effect of Pores on Mechanical Behavior. Application to the Composite Material / A. Salih, O. Fassi Fehri, S. Charif d'Ouazzane, Z. Azari // Проблемы прочности, 2002, №5 С. 17-31

49. Стрижало В.А. Прочность и акустическая эмиссия материалов и элементов конструкций / В.А. Стрижало, Ю.В. Добровольский, В.А. Стрельченко и др. – Киев: Наук. думка. 1990. – 232 с.

50. J. L. Chaboche Continuum damage mechanics, anisotropy and damage deactivation for brittle materials like concrete and ceramic composites / J. L. Chaboche, P.M. Lesne, J.F. Maire // Int. J. Damage Mech., 4, № 1, 5-22 (1995)

51. Латышенко В.А. Диагностика жесткости и прочности материалов / В.А. Латішенко. – Рига: Изд-во «Зинатие». 1968. – 320 с.

52. Букетов А.В. Підвищення точності визначення динамічних характеристик епоксикомполітів / А.В. Букетов // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2006 №4. – С. 127-128

53. M. Di Prisco Mixed mode fracture in plain and reinforced concrete: some results on benchmark tests / M. Di Prisco, L. Ferrara, F. Meftah, et al. // Int. J. Fracture, 103, 127-148 (2000)

54. Бакулин В.И. Метод конечных элементов и голографическая интерферометрия в механике композитов / В.И. Бакулин, А.А. Рассоха. – М.: Машиностроение, 1987. – 310 с.

55. Басов Ф.А. Контроль напряженно-деформированного состояния композиционных материалов с помощью чувствительных элементов на базе углеродных нитей / Ф.А. Басов // Вестник машиностроения. 2006. №11. – С. 17-21

56. Боярчук А.О. Неруйнівне оцінювання тріщин на основі частоти вільних коливань виробів / А.О. Боярчук, Н.І. Бурау, Л.М. Гельман // Вісник ЖІТІ. 1998. №7. – С. 129-133

57. Bouraou N.I. “Theoretical Bases of Free Oscillation Method for Acoustical Non-Destructive Testing” / N.I. Bouraou, L.M. Gelman // In Proceedings of the 1997 National Conference on Noise Control Engineering, State College, Pennsylvania, Book 1, 1997. – 553 p.

58. Витрук Ю.В. Особенности применения преобразования Фурье для диагностики материалов методом свободных колебаний / Ю.В. Витрук, В.С. Еременко // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2006. №6. – С. 24-26

59. Купкін Є.С. Використання апаратних засобів формування цифрових відео зображень для дослідження зразків природного каменю / Є.С. Купкін, Ю.О. Подчашинський, О.О. Ремезова // Вісник ЖДТУ. 2004. №2 (29). – С. 191-197

60. Никитин Ю.Б. Оптико-акустический эффект в неразрушающем контроле материалов и изделий / Ю.Б. Никитин, Д.Н. Коротаев, Д.Ю. Никонов // Известия вузов. Машиностроение. 2006. №2. – С. 44-50

61. Shindo Y. Effect of interface layers on elastic wave propagation in a metal matrix composite reinforced by particles / Y Shindo, H. Nozaki // Trans. ASME: J. heat. Transfer. – 1995. – 62, №1. – P. 178-158

62. Скороход В.В. Теория физических свойств пористых и композиционных материалов и принципы управления их микроструктурой в



технологических процессах / В.В. Скороход // Порошковая металлургия. – 1995. - №1/2. – С. 53-71

63. Неразрушающий контроль: Справ.: в 8-ми т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 3: И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. Ультразвуковой контроль. – М.: Машиностроение, 2006. – 864 с.

64. Руцицкий Я.Я. Хвилі в матеріалах з мікроструктурою / Я.Я. Руцицкий, С.І. Цурпал. – К.: Ін-т механіки НАНА України, 1997. – 377 с.

65. Качанов В.К. Использование радиолокационных сигналов и методов их обработки в ультразвуковой дефектоскопии / В.К. Качанов // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 1995. №2. – С. 3-18

66. Илюшин С.В. Автоматизированная система для неразрушающего контроля крупногабаритных неметаллических изделий / С.В. Илюшин, В.А. Сясько // Дефектоскопия. 1989. №9. – С. 86-88

67. Скрипник Ю.О. Визначення якісного складу матеріалів зондуванням їх акустичними коливаннями скінченної амплітуди / Ю.О. Скрипник, С.М. Лісовець // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. 1998. №1. – С. 46-49

68. Иванов В.Г. Автоматический ультразвуковой контроль композитов катящимися преобразователями / В.Г. Иванов, Л.И. Скоробогат. // Дефектоскопия. 1990. №5. – С. 30-37

69. Ковалев А.В. Импульсный эхо-метод при контроле бетона. Помехи и пространственная селекция / А.В. Ковалев, В.Н. Козлов, А.А. Самокрутов, В.Г. Шевалдыкин, Н.Н. Яковлев // Дефектоскопия. 1990. – №2. – С. 29-41

70. Безымянный Ю.Г. Акустическое отображение материалов с развитой мезоструктурой / Ю.Г. Безымянный // Акустичний вістник. – 2006. – 9, №2. – С. 3-16

71. Сандалов А.В. Диагностический центр типа 4007 для исследования и контроля свойств изделий из композитов на основе полимеров / А.В. Сандалов, Р.В. Вейс // Дефектоскопия. 1991. - №8. – С. 12-15

72. Андрейків О.Є. Акустико-емісійні критерії для експрес-оцінки внутрішніх пошкоджень композитних матеріалів / О.Є. Андрейків, В.Р. Скальський, О.М. Сергієнко // Фізико-хімічна механіка матеріалів – 2001. – №1. – С. 91-100

73. Бобренко В.М. Акустический контроль механических напряжений / В.М. Бобренко, А.Н. Куценко, В.П. Малахов. – Одесса: Астропринт, 1997. – 272 с.

74. Калюжный А.Я. Об одном методе анализа эффективности приема сигналов в акустических средах с многоходовым распространением и рассеянием звука / А.Я. Калюжный // Акустичний вісник. 2008. Том 11, №1. С. 12-27

75. Хорошавина С.Г. Вероятностные модели оценки качества композиционных материалов с использованием метода акустической эмиссии / С.Г. Хорошавина // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 1994. №3-4. С. 3-10

76. Носов В.В. Акустико-эмиссионный критерий прочности композитных материалов / В.В. Носов, С.В. Носов // Известия вузов. Машиностроение. 1989. №9. – С. 25-29

77. Данилевский Л.Н. Акустический метод контроля степени уплотнения бетонной смеси при виброформовании / Л.Н. Данилевский, С.Т. Завтрак, А.Д. Иванов // Акустический журнал. 1987. Том 35. Вып. 3. – С. 365-368

78. Кондратьев А.И. Исследование процесса полимеризации эпоксидных смол акустическими методами / А.И. Кондратьев, В.И. Римлянд, А.В. Казарбин, В.И. Иванов // Акустический журнал. 1995. Том 41 Вып. 3. – С. 461-464

79. Муравин Г.Б. Акустико-динамический контроль напряженного состояния бетона / Г.Б. Муравин, Я.В. Симкин, Е.Э. Розумович, А.И. Мерман // Дефектоскопия. 1989. №12. – С. 3-11

80. Муравин Г.Б. Исследование процесса твердения бетона при низких температурах методом акустической эмиссии / Г.Б. Муравин, Ю.С. Снежницкий, Г.С. Павловская // Дефектоскопия. 1989. №10. – С. 9-15

81. Безимьянний Ю.Г. Акустичний контроль матеріалів з розвинотою мезоструктурою / Ю.Г. Безимьянний // Фізико-хімічна механіка матеріалів – 2007. - №4. – С. 53-65

82. Козлов В.Н. Экспериментальная оценка затухания ультразвука в бетоне / В.Н. Козлов, В.Г. Шевалдыкий, Н.Н. Яковлев // Дефектоскопия. 1988. №2. – С. 67-75

83. Качанов В.К. Разработка новых методов ультразвукового контроля полимерных композиционных материалов на основе использования радиолокационных сигналов (Обзор) / В.К. Качанов, Д.А. Рапопорт, А.В. Мозговой // Дефектоскопия. 1990. №9. – С. 3-20

84. Ермолов И.Н. Достижения в теоретических вопросах ультразвуковой дефектоскопии, задачи и перспективы / И.Н. Ермолов // дефектоскопия. – 2004. - №10. – С. 13-48

85. Кольцова И.С. Поглощение и рассеяние акустических волн в дисперсных средах / И.С. Кольцова // Акустический журнал. 1987. Том 33. Вып. 3. – С. 510-512

86. Абрамов С.К. Резонансные методы исследования динамических свойств пластмасс / С.К. Абрамов. – Ростов н/Д.: Изд-во Ростовского ун-та, 1978. – 136 с.

87. Аскадский А.А. Химическое строение и физические свойства полимеров / А.А. Аскадский, Ю.И. Матвеев. – М.: Химия, 1983. – 248 с.

88. Калинин Н.Г. Конструкционное демпфирование в неподвижных соединениях / Н.Г. Калинин, В.И. Лебедев и др.. – Рига: Изд-во АН ЛатвССР, 1960. – 170 с.

89. Кочнева Л.Ф. Внутреннее трение в твердых телах при колебаниях / Л.Ф. Кочнева. – М.: Наука, 1979. – 97 с.

90. Криштал М.А. Внутреннее трение в металлах и сплавах / М.А. Криштал, Ю.В. Пигузов, С.А. Головин. – М.: Metallurgy, 1964. – 245 с.
91. Крэндалл С. Роль демпфирования в теории колебаний / С. Крэндалл // Механика: Сб. пер. – М.: Наука, 1971. – 129, №5. – С. 47-53.
92. Писаренко Г.С. Рассеяние энергии при механических колебаниях / Г.С. Писаренко. – Киев: Изд-во АН УССР, 1962. – 436 с.
93. Писаренко Г.С. Обобщенная модель учета рассеяния энергии при колебаниях / Г.С. Писаренко. – Киев: Наук. думка, 1985. – 240 с.
94. Испытания материалов. Справочник. Под. ред. Блюменауэра. Пер с нем. 1979. – 488 с.
95. Писаренко Г.С. Методы определения характеристик демпфирования колебаний упругих систем / Г.С. Писаренко, В.В. Матвеев, А.П. Яковлев. – Киев: Наук. думка, 1976. – 86 с.
96. Пелех Б.Л. О методах экспериментального определения коэффициента демпфирования механических колебаний / Б.Л. Пелех, Б.И. Саляк // Завод. лаборатория. – 1984. - №6. – С. 77-79.
97. Пелех Б.Л. Контактные задачи для слоистых элементов конструкций и тел с покрытиями / Б.Л. Пелех, А.В. Максимюк, И.М. Коровайчук. – Киев: Наук. думка, 1988. – 280 с.
98. Paipeties S.A. Interfacial phenomena and reinforcing mechanism in rubber-carbon black composites / S.A. Paipeties // Fibr. Sci. and Technol. – 1984. – 21, № 2. – P. 107-124.
99. Somashakar B. Structural damping / B. Somashakar // Instr. and Control. Syst. – 1968. – 41, № 11/ - P. 79-80.
100. Zorowski C. Bonding characterization in reinforced composites / C. Zorowski // Mech. Behav. Mater. - 1972. – Ryoto. - 5. – P. 28-41.
101. Каргин В.А. Структура и механические свойства полимеров / В.А. Каргин. – М.: Наука, 1979. – 451 с.
102. Нильсен А. Механические свойства полимеров и полимерных композиций / А. Нильсен, Е. Лоуренс. – М.: Химия. 1978. – 310 с.

103. Яковлев А.П. Диссипативные свойства неоднородных материалов и систем / А.П. Яковлев. – Киев : Наук. думка, 1985. – 248 с.
104. Бидерман В.Л. Теория механических колебаний / В.Л. Бидерман. – М.: Высшая школа, 1980. – 408 с.
105. Конструкционные полимеры / Под ред. П.М. Огибалова. – М.: Изд-во МГУ, 1972. – Т. 1. – 322 с.; Т. 2. – 306 с.
106. Никифоров А.С. Вибропоглощение на судах / А.С. Никифоров. – Л.: Судостроение, 1979. – 184 с.
107. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории упругих колебаний / Я.Г. Пановко. – М.: Машиностроение, 1967. – 317 с.
108. Степаненко Н.Д. Анизотропия демпфирующих свойств композиционных материалов / Н.Д. Степаненко, В.Н. Кошевников, Г.И. Гуняев, А.Ф. Румянцев // Пробл. Прочности. – 1982. - №4. – С. 18-23.
109. Уманский Э.С. К оценке конструкционных демпфирующих свойств композиционных материалов, армированных однонаправленными волокнами / Э.С. Уманский // Рассеяние энергии при колебаниях механических систем. – Киев: Наук. думка, 1970. – С. 110-127.
110. Nelson D.J. Interfacial slip and damping in reinforced composites / D.J. Nelson, J.W. Hancock // J. Mater. Sci. – 1978. - 13, № 11. – P. 2429-2440.
111. Хильчевский В.В. исследование частотной зависимости диссипативных свойств капрона / В.В. Хильчевский // Сопротивление материалов и теория упругости. – Киев: Будівельник, 1965.- Вып. 1. – С. 47-49.
112. Чернышев В.М. Демпфирующие свойства конструкционных пластмасс / В.М. Чернышев // Пробл. прочности в машиностроении. – М.: Изд-во АН СССР, 1972. – Вып. 7. – С. 113-117.
113. Хильярд Н.К. Прикладная механика ячеистых пластмасс / Н.К. Хильярд, Дж. Янг, Г. Менис и др.. – М.: Мир, 1985. – 360 с.
114. Pradhan B. Dependence of damping capacity on operating frequency of some rubber-like isolating materials in compression loading / B. Pradhan,

I. Kharagpur, N. Patnaik // Int. Conf. Struct. Prop. Relat. Rubber. – Kharagpur, 1980. – P. 137-139.

115. Полтораус Е.В. О частотной зависимости внутреннего рассеяния энергии в некоторых полимерных материалах / Е.В. Полтораус // Тр. РИИЖТа. – М.: 1967. – Вып. 64. – С. 54-56

116. Андреев В.П. Исследование демпфирующей способности консольных плоских стержней из Д16 с покрытиями с учетом напряженных состояний и частоты / В.П. Андреев, Е.А. Данилов // Рассеяние энергии при колебаниях механических систем. – Киев : Наук. думка, 1982. – С. 253-260.

117. Пелех Б.Л. Нелинейные эффекты рассеяния энергии колебаний в армированных композиционных материалах / Б.Л. Пелех, Б.И. Саляк // Тр. 1-го всесоюз. симп. «Нелинейная теория тонкостенных конструкций и биомеханика». – Кутаиси: Изд-во Тбилисского ун-та, 1985. – С. 373-375.

118. Пелех Б.Л. Динамическая жесткость и демпфирующие свойства упругих элементов с армирующими композиционными покрытиями / Б.Л. Пелех, Б.И. Саляк, И.С. Когут, А.Ю. Мыкита // Пробл. прочности. – 1986. – №2. – С. – 81-84.

119. Алексеенко В.В. Вибрации в технике: В 6 Т / В.В. Алексеенко, А.С. Больших, М.Д. Генкин и др.. – М.: Машиностроение, 1981. - Т. 5. – 496 с.

120. Сорокин Е.С. Методы экспериментального определения внутреннего трения в твердых телах / Е.С. Сорокин // Вопр. прикл. Механики. – 1964. – вып. 193. – С. 5-41.

121. Кокошвили С.М. Методы динамических испытаний полимерных материалов / С.М. Кокошвили. – М.: Наука, 1979. – 451 с.

122. Методы испытания, контроля и исследования машиностроительных материалов / Под ред. А.Т. Туманова. – М.: Машиностроение, 1973. – Т. 3. – 283 с.

123. Постников В.С. Внутреннее трение в металлах / В.С. Постников. – М.: Металлургия, 1969. – 332 с.

124. Крылов Н.А. Радиотехнические методы контроля качества железобетона / Н.А. Крылов, В.А. Калашников, А.М. Полищук. – Л.; М.: Стройиздат, 1966. – 379 с.

125. Сорокин Е.С. Методы оценки характеристик динамических свойств полимерных материалов: (Обзор) / Е.С. Сорокин, С.К. Абрамов // Завод. лаборатория. – 1972. - №5. – С. 18-23.

126. Тамуж В.П. Микромеханика разрушения полимерных материалов / В.П. Тамуж, В.С. Куксенко. – Рига: Зинатне, 1978. – 294 с.

127. Трощенко В.Т. Усталость и неупругость металлов / В.Т. Трощенко. – Киев: Наук. думка, 1974. – 256 с.

128. Уржумцев Ю.С. Методы испытания и прогнозирования свойств конструкционных полимерных материалов / Ю.С. Уржумцев // Журн. Всесоюзн. хим. о-ва им. Д.И. Менделеева. – 1978. – 23, №3. – С. 310-318.

129. Focsa G. Some aspects concerning modern efficient methods of defining internal damping / G. Focsa, L. Strat // Bull. Inst. Politech. Iasi. – 1980. – 36. – P. 23-28.

130. Новик А.С. Внутреннее трение в металлах / А.С. Новик // Успехи физики металлов. – М.: Metallurgizdat, 1956. – Т.1. – С. 7-81.

131. Писаренко Г.С. Прочность материалов и элементов конструкций в экстремальных условиях / Г.С. Писаренко, А.А. Лебедев, В.В. Матвеев и др.. – Киев: Наук. думка, 1980. – Т.2. – 772 с.

132. Clarkson B.L. On the measurement of coupling loss factor structural connections / B.L. Clarkson, M.F. Ranky // J. Sound and Vibr. – 1984. – 94 s.

133. Анисимов В.А. Диагностика механических напряжений на основе акустоупругого эффекта / В.А. Анисимов, Б.И. Каторгин, А.Н. Куценко, В.П. Малахов, А.С. Рудаков, В.К. Чванов. – Одесса: Оптимум. – 2003, - 198 с.

134. Фомин Н.Е. Динамический механический анализ / Н.Е. Фомин, В.А. Юдин, А.А. Киреев // Инновационное образование. – 2013. – № 4(7). – С. 1-9.

135. Гитис М.Б. Особенности акустических измерений в сильно поглощающих средах / М.Б. Гитис, А.А. Шенкер // Дефектоскопия. – 1982. – №10. – С. 86-94.
136. Жуков С.В. Об измерении скорости распространения ультразвука в сильнопоглощающих средах / С.В. Жуков, В.Д. Фомин // Дефектоскопия, 1986. - № 5. – С. 84-85.
137. Иориш Ю.И. Виброметрия / Ю.И. Иоршин. – М.: Машгиз, 1963. – 772 с.
138. Бидерман В.Л. Прикладная теория механических колебаний / В.Л. Бидерман. – М.: Высшая школа, 1980. – 408 с.
139. Белоус В.А. Механические контроль систем с одной степенью свободы: учеб. пособие / В.А. Белоус, А.Ф. Дашенко, П.А. Сурьянинов. Под редакцией П.А. Белоуса. – О.: Наука и техника, 2009. – 76 с.
140. Ультразвуковой контроль материалов: Справ. изд. Й. Крауткремер, Г. Крауткремер; Пер. с нем. – М.: Металлургия, 1991. – 752 с.
141. Неразрушающий контроль металлов и изделий. Под. ред.. Г.С. Самойловича. – М.: Машиностроение, 1976. – 456 с.
142. Разрушение. Т. 7: Разрушение неметаллов и композиционных материалов/ Редактор Г. Либовец. М.: Мир, 1976. 634 с.
143. Болтон У. Конструкционные материалы: металлы, сплавы, полимеры, керамика, композиты: Карманный справочник. /Пер. с англ. / У. Болтон. – М.: Издательский дом «Додэка-XX1», 2004. 320 с ил. (Серия «Карманный справочник»)
144. Ваксер Д.Б. и др. Алмазная обработка технической керамики / Д.Б. Ваксер и др.. – Л.: Машиностроение, 1976. 160 с
145. Мандельштам Л.И. Лекции по колебаниям, Собр. Трудов, Т. 4 / Л.И. Мандельштам. – М: АН СССР, 1955. – С. 9-55
146. 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*

147. Голофеева М.А. Метод исследования демпфирующей способности синтегрона / 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

148. Дорожовець М. та ін. Основи метрології та вимірювальної техніки: Підручник: У 2 т. / М. Дорожовець, В. Мотало, Б. Стадник, В. Василюк, Р. Борек, А. Ковальчик; За ред. Б. Стадника. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2005. – Т. 1 Основи метрології. – 532 с.

149. Колчков, В.И. Метрология, стандартизация и сертификация / В.И. Колчков. М.: Владос, 2010. – 398 с.

150. Бирюков, С.В. Метрология: Тексты лекций / С.В. Бирюков, А.И. Чередов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.gumer.info/bibliotek\\_Buks/Science/biruk/03.php](http://www.gumer.info/bibliotek_Buks/Science/biruk/03.php)

151. Якушев, А.И. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения / А.И. Якушев, Л.Н. Воронцов, Н.М. Федотов. – М.: Машиностроение, 1986. – 352 с.

152. Назаров Н.Г. Метрология. Основные понятия и математические модели / Н.Г. Назаров. – М.: Высшая школа, 2002. – 348 с.

153. Новицкий, П.В. Оценка погрешностей результатов измерений / П.В. Новицкий, И.А. Зограф. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 232 с.

154. Погрешность измерения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org/wiki/%CF%E3%F0%E5%F8%ED%EE%F1%F2%FC> . – 02.11.12.

155. Гугнін, В.П. Метрологічне забезпечення та перевірка засобів вимірювальної техніки фізичних величин / В.П. Гугнін, Г.О. Оборський. – К.: Наука і техніка, 2011. – 220 с.

156. Оборський, Г.О. Вимірювання неелектричних величин / Г.О.

Оборський, П.Т. Слободяник. – К.: Наука и техника, 2005. – 200 с.

## ДОДАТКИ

## ДОДАТОК А

### ПРОГРАМА ОПИТУВАННЯ ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ ДІАГНОСТИЧНОГО КОМПЛЕКСУ «Дельфін – 1М» (C++)

```
#define F_CPU 1000000L
```

```
#include <avr/io.h>
```

```
#include <util/delay.h>
```

```
#include <inttypes.h>
```

```
#include <avr/eeprom.h>
```

```
#include <avr/interrupt.h>
```

```
#include <string.h>
```

```
#include <stdio.h>
```

```
uint16_t ds18b20Read(uint8_t bus, uint8_t * id);
```

```
#define DS18B20_FAMILY_ID      0x28
```

```
#define DS18B20_ID              77
```

```
#define DS18B20_START_CONVERSION 0x44
```

```
#define DS18B20_READ_SCRATCHPAD 0xbe
```

```
#define DS18B20_ERROR           1000
```

```
#define BUS                      ONEWIRE_PIN_4
```

```
#define MAX_DEVICES              1
```

```
#define TxPin 2;
```

```

int a;
uint8_t moo = 0;
uint8_t data[5] = {DS18B20_ID, 0, 0, 0, 0};

uint16_t readVccVoltage(void) {

    // начало цикла
    cout << a ;
    ADMUX = _BV(MUX3) | _BV(MUX2);
    ADCSRA |= _BV(ADEN) | _BV( ADSC) | _BV(ADPS1) | _BV(ADPS0);
    _delay_ms(1); // Задержка 1 мс
    ADCSRA |= _BV(ADSC); // опрос каналов ввода с 1 по 2
    if (a == 1){
        ADMUX = _BV(MUX3) | _BV(MUX2);
        ADCSRA |= _BV(ADEN) | _BV( ADSC) | _BV(ADPS1) | _b;
    }
    if (a == 2){
        ADMUX = _BV(MUX3) | _BV(MUX2);
        ADCSRA |= _BV(ADEN) | _BV( ADSC) | _BV(ADPS1) | _b1;
    }

    ADCSRA |= _BV(ADSC); // преобразование данных
    while( ADCSRA & _BV( ADSC) );
    uint8_t low = ADCL;

```

```

uint8_t high = ADCH;

uint16_t adc = (high << 8) | low;           // 0<= result <=1023
uint8_t vccx10 = (uint8_t) ( (11 * 1024) / adc);
ADCSRA &= ~_BV( ADEN );
return( vccx10 );

}
}

volatile uint8_t f_wdt = 1;
uint8_t loop_count = 0;

int main(void)

for (c >= 1 ; c <= 2 ; c++ ) {           //вывод данных на порт для передачи в ПК
    if (c % 10 == 0) {

        for (int j = 0; j <= 2; j++ ) {
            uint8_t vccx10 = readVccVoltage();
            data [1] = vccx10;
            if (ds18b20 != NULL){
                temp = ds18b20Read(ds18b20->bus, ds18b20->id);
                data [3] = (temp & 0xFF);
                data [2] = ((temp>>8) & 0xFF);
            }
        }
    }
}

```

```

        data [4] = oneWireDataCrc(data);
        _delay_ms(1);
        loop_count = 0;
        transmitArray(&man, 5, data);
        transmitArray(&man, 5, data);
    }
}
}

return 0;
}

```

```

uint16_t ds18b20Read(uint8_t bus, uint8_t * id)
{

```

```

    #ifdef ONEWIRE_USE_PARASITIC_POWER
        ONEWIRE_RELEASE_BUS(bus);
        _delay_ms(850);

    #else
        while (!b(bus))
            ;
    #endif
    // Reset, presence.
    if(!b(bus))
        return DS18B20_ERROR;

    // Match id again.
    oneWireMatchRom(id, bus);

```

```
// Send READ SCRATCHPAD command.  
oneWireSendByte(DS18B20_READ_SCRATCHPAD, bus);  
  
c = oneWireReceiveByte(bus);  
c |= (oneWireReceiveByte(bus) << 8);  
  
return c;  
}
```



# ДОДАТОК



## АКТ

Ми, що нижче підписалися, начальних виробництва холдингової компанії «Мікро» Долинський О.О. та старший викладач кафедри «Металорізальні верстати, метрологія та сертифікація» Одеського національного політехнічного університету Голофесев М.О. склали цей акт в тому, що на ХК «Мікро» був впроваджений метод вимірювання декременту затухання коливань в неметалевих гетерогенних матеріалах.

Метод вимірювання декременту затухання коливань в неметалевих гетерогенних матеріалах розроблено та впроваджено на ХК «Мікро» в процесі виконання науково-дослідницької роботи «Вивчення впливу параметрів матеріалу на динамічні характеристики механізмів різання» на кафедрі «Металорізальні верстати, метрологія та сертифікація» Одеського національного політехнічного університету. Метод вимірювання декременту затухання коливань в неметалевих гетерогенних матеріалах розроблено та впроваджено на ХК «Мікро» в процесі виконання науково-дослідницької роботи «Вивчення впливу параметрів матеріалу на динамічні характеристики механізмів різання» на кафедрі «Металорізальні верстати, метрологія та сертифікація» Одеського національного політехнічного університету.

Директор ХК «Мікро»  
О.О. Долинський

М.О. Голофесев

## ДОДАТОК В

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Проректор ОНПУ з навчальної  
та науково-педагогічної роботи

С.А. Нестеренко

2 березня 2015 р.



### АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Складений в тому, що матеріали та результати дисертаційної роботи ГОЛОФЄСВОЇ Марини Олександрівни «Удосконалення методів та засобів вимірювання дисипативних властивостей неметалевих гетерогенних матеріалів» були використані при розробці лабораторної роботи з дисципліни «Методи та засоби вимірювання» для студентів четвертого курсу Інституту промислових технологій, дизайну та менеджменту. В цій лабораторній роботі визначався декремент затухання коливань для виробів з неметалевих гетерогенних матеріалів із закладними різних конструкцій.

Викладач дисципліни

М.О. Голофєсва