

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Фізико-технічний інститут, факультет будівництва, архітектури та дизайну

Композиційних матеріалів, хімії та технологій

Пояснювальна записка

до дипломного проекту (роботи)

магістр

на тему «Дослідження впливу технологічних факторів

на якість виробництва лопаті несучого гвинта»

Виконав: студент 2 курсу, групи БАД 213м

Спеціальності 132-Матеріалознавство

Освітня програма (спеціалізація)

Композиційні та порошкові матеріали,

покриття

Анатолій КРАВЧЕНКО

Керівник Іван АКІМОВ

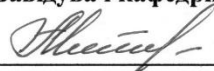
Рецензент Андрій СКРЕБЦОВ

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»
 (повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет будівництва, архітектури та дизайну
 Кафедра «Композиційні матеріали, хімія та технології»
 Ступінь вищої освіти магістр
 Спеціальність 132 Матеріалознавство
(код і найменування)
 Освітня програма «Композиційні та порошкові матеріали, покриття»
(назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри КМХТ

 проф. Міт'яєв О.А.

«14» жовтня 2024 року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)

Кравченко Анатолій Павлович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Дослідження впливу технологічних факторів на якість виробництва лопаті несучого гвинта.

керівник проекту (роботи) Акімов Іван Васильович, к.т.н., доцент,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затвержені наказом закладу вищої освіти від «11» жовтня 2024 року № 407.

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 14.12.2024.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Матеріали несучого гвинта літального апарату та умови його роботи, технологія виготовлення несучого гвинта літального апарату, якість виготовлення та технологічні фактори що на неї впливають.

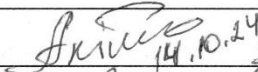
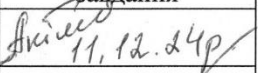
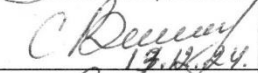
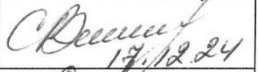


Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

- 1) Вступ.
- 2) Стан питання з актуальності проблеми виготовлення та експлуатації несучих гвинтів літальних апаратів.
- 3) Методичне забезпечення експериментальних досліджень. Опис об'єкта дослідження. Опис методів виготовлення несучих гвинтів з композитних матеріалів та подальшого контролю якості. Інші методики досліджень.
- 4) Опис закономірностей формування характеристик якості склеювання матеріалів несучого гвинта та застосовувані при цьому технологічні методи. Викладення результатів досліджень та їх висновки.
- 5) Оцінка впливу температури полімеризації та часу витримки на якість склеювання матеріалів несучого гвинта.
- 6) Висновки.
- 7) Перелік посилань.

6 5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

- 1) Креслення «несучого гвинта літального апарату».
- 2) Класифікація і характеристика методів контролю якості матеріалів та виробів.
- 3) Основні види неруйнівних методів контролю.
- 4) Ефективність неруйнівних методів контролю.
- 5) Сутність акустичного методу вільних коливань.
- 6) Конструкція лопаті несучого гвинта.
- 7) Акустичний контроль лопатей несучого гвинта.
- 8) Задіяна апаратура під час дослідження.
- 9) Робочі стандартні зразки для налаштування дефектоскопу.
- 10) Підготовка до роботи і налаштування дефектоскопу. Методика контролю. Можливості та особливості імпедансного методу. Загальні рекомендації з контролю з'єднань між обшивкою та стільниковим заповнювачем.
- 11) Планування експерименту по виявленню впливу температури та часу витримки на величину площин дефектів склеювання.
- 12) Аналіз результатів експерименту, розрахунок коефіцієнтів кореляції. Визначення оптимального рівня факторів варіювання.
- 13) Графіки впливу температури та часу витримки на величину площин дефектів склеювання.
- 14) Висновки.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)


Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	Прийняв виконане завдання
1-3	Акімов І.В. к.т.н., доцент	 14.10.24	 11.12.24
1-3	Нормоконтроль Савченко В.О. к.т.н., доцент	 17.12.24	 17.12.24
	Перевірка на плагіат. Петрашов О.С.	 19.12.24	 19.12.24

7. Дата видачі завдання «14» жовтня 2024 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1)	Літературний аналіз	30.10.24	Вик.
2)	Опис об'єкту дослідження та критерії його якості.	15.11.24	Вик.
3)	Оцінка методів контролю якості.	25.11.24	Вик.
4)	Планування експерименту та його проведення.	05.12.24	Вик.
5)	Аналіз результатів експерименту та визначення оптимальних показників факторів варіювання.	14.12.24	Вик.
6)	Висновки.	14.12.24	Вик.

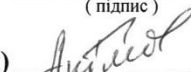
Студент(ка)


(підпис)

Кравченко А.П.

(прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи)


(підпис)

Акімов І.В.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра «Дослідження впливу технологічних факторів на якість виробництва лопаті несучого гвинта»: 52 с., 10 рис., 2 табл., 20 джерел.

Об'єктом дослідження являється неруйнівний контроль.

Метою дослідження було виявлення дефектів акустичним методом вільних коливань у зонах руйнування клейових з'єднань між елементами багатошарових конструкцій, виконаних з різних металевих та неметалічних матеріалів з високим коефіцієнтом загасання пружних коливань і малим модулем пружності.

У кваліфікаційній роботі було проведено аналіз технологічних факторів виробництва на якість склеювання лопатей несучого гвинта вертольоту. Проведено підбір режимів склеювання лопатей, в залежності від температури та часу полімеризації клею.

Ключові слова: **НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ, КЛЕЙОВІ З'ЄДАННЯ, ТЕХОЛОГІЧНІ ФАКТОРИ, ЛОПАТЬ НЕСУЧОГО ГВИНТА ВЕРТОЛЬОТА**

SYMMARY

Master's qualifying paper "Study of the influence of technological factors on the quality of production of rotor blades": 52 pages, 10 figures, 2 tables, 20 references.

The object of the study is non-destructive testing.

The purpose of the study was to detect defects by the acoustic method of free vibrations in the destruction zones of adhesive joints between elements of multilayer structures made of various metallic and non-metallic materials with a high damping coefficient of elastic vibrations and a low modulus of elasticity.

In the qualification work analyzed the technological factors of production for the quality of gluing of helicopter rotor blades. The selection of blade gluing modes was carried out, depending on the temperature and polymerization time of the glue.

Keywords: NON-DESTRUCTIVE TESTING, ADHESIVE JOINTS, TECHNOLOGICAL FACTORS, HELICOPTER ROD BLADE

ЗМІСТ

Реферат.....	4
Summary.....	5
Вступ.....	7
Розділ 1 Поняття про неруйнівні методи контролю.....	9
1.1 Класифікація і характеристика методів контролю якості матеріалів та виробів.....	9
1.2 Основні види неруйнівних методів контролю (НМК).....	11
1.3 Ефективність неруйнівних методів контролю (НМК).....	17
1.4 Сутність акустичного методу вільних коливань.....	18
Розділ 2 Методика дослідження.....	24
2.1 Конструкція лопаті несучого гвинта.....	25
2.2 Акустичний контроль лопатей несучого гвинта.....	27
2.3 Задіяна апаратура під час дослідження.....	28
2.3.1 Робочі стандартні зразки для налаштування дефектоскопу.....	29
2.3.2 Підготовка до роботи і налаштування дефектоскопу.....	30
2.3.3 Методика контролю.....	32
2.4 Можливості та особливості імпедансного методу	33
2.5 Загальні рекомендації з контролю з'єднань між обшивкою та стільниковим заповнювачем.....	38
Розділ 3 Дослідження впливу технологічних факторів на якість виготовлення лопаті несучого гвинта.....	43
Висновки.....	49
Перелік джерел посилань.....	50

ВСТУП

Лопать несучого гвинта - це дуже важлива складальна одиниця в конструкції гвинтокрила. За допомогою лопаті створюється підйомна сила, яка безпосередньо і керує пересуванням. Тому важливо проводити контроль якості виготовлення лопаті на протязі всього технологічного процесу її виготовлення. Наприклад, склеювання лонжерону з хвостовими відсіками особливо відповідальна операція, від якої безпосередньо залежить термін роботи лопаті на вертольоті. Якість склеювання залежить від багатьох факторів, наприклад: якість вхідних деталей (хвостових відсіків, партії клею), температура полімеризації клею, час витримки та безпосередньо кваліфікації робітника. Один з основних видів браку це «непроклеювання». Даний дефект впливає на площину склеєної поверхні лонжерону та хвостових відсіків. Тому дуже важливо контролювати даний дефект, для цього застосовуються різні види руйнівного та не руйнівного контролю [8].

Акустичний контроль деталей є одним із найефективніших методів неруйнівного контролю (НК), який дозволяє виявляти дефекти та оцінювати внутрішню структуру матеріалів без їх пошкодження. Цей метод використовує ультразвукові хвилі для вивчення матеріалу деталей, що особливо важливо в таких галузях, як машинобудування, авіація, будівництво та енергетика, де висока надійність і безпека є критичними.

Акустичний контроль базується на використанні високочастотних механічних хвиль, які генеруються за допомогою спеціальних датчиків, що перетворюють електричні сигнали в механічні коливання. Ці хвилі проходять через матеріал деталі, а їх відбиття, заломлення та поглинання аналізуються для виявлення дефектів.

Метою даної роботи є дослідження впливу температури та часу полімеризації клею на кількість виявлених непроклеїв після виконання склеювання хвостових відсіків до лонжерону несучого гвинта [1].

Результати дослідження будуть мати практичне значення для подальшого підбору режимів склеювання за для зменшення площі непроклеїв.

Дослідження було проведено на базі цеху виготовлення металевих та композитних лопатей АТ «Мотор Січ».

РОЗДІЛ 1

ПОНЯТТЯ ПРО НЕРУЙНІВНІ МЕТОДИ КОНТРОЛЮ

1.1. Класифікація і характеристика методів контролю якості матеріалів та виробів

Усі методи технічного контролю небезпечного виробничого обладнання можна розділити на три групи: руйнівний контроль, контрольне пошкодження та неруйнівний контроль [11].

Руйнівний контроль - це серія випробувань, які вимагають безпосереднього відбору зразків або вирізання зразків з матеріалу об'єкта. При цьому об'єкт залишається непридатним до тих пір, поки місце відбору проб (зразок) не буде відновлене.

Руйнівний контроль включає:

- лабораторний хімічний аналіз матеріалу об'єкта (вимагає висвердлювання певної кількості стружки);
- металографічний (дослідження металографічної структури об'єкта, вимагає вирізання меленої стружки);
- лабораторні механічні випробування матеріалу об'єкта на розтяг, стиск, вигин і ударну в'язкість (спеціальні зразки (шаблони) потрібно вирізати - темплети).

Контроль пошкоджень - це серія таких контролів, що проводяться безпосередньо на об'єкті, які зберігають працездатність об'єкта, але залишають непереборні сліди в контрольованих зонах, які не заважають експлуатації.

Інспекція на пошкодження включає, зокрема, такі види контролю

- вимірювання твердості (тест на твердість) шляхом натискання на спеціальний індентор (кулька Бабіта, алмазний наконечник; на поверхні об'єкта залишається вдавнення)

- стилоскопіювання (оцінка марки сталі за складом світлового спектру дуги вольтової, що утворюється між електродом спеціального приладу - стилоскопом, і поверхнею об'єкта, сліди обпалення (на поверхні залишається слід від прогару).

Неруйнівний метод контролю (НК), або дефектоскопія - узагальнена назва методу контролю матеріалів (виробів), що використовується для виявлення порушень макроструктурної суцільності або однорідності, відхилень у хімічному складі та інших цілей, які не потребують руйнування зразка матеріалу та/або всього виробу [11]. Розрізняють «неруйнівний контроль» і «неруйнівний фізичний контроль». Неруйнівний фізичний контроль - це сукупність таких видів неруйнівного контролю, які потребують використання спеціальних матеріалів, складного обладнання та досить високотехнологічних методик. З усіх видів неруйнівного контролю, що застосовуються на небезпечних виробничих об'єктах, єдиним видом, який не відноситься до фізичного контролю, є візуально-вимірювальний контроль (ВНК). Таким чином, поєднання цих понять можна виразити наступним рівнянням:

Неруйнівний контроль = неруйнівний фізичний контроль + ВНК.

Основними вимогами до методів неруйнівного контролю або дефектоскопії [12] є:

- можливість контролю на всіх стадіях виробництва, під час експлуатації та ремонту виробу;

- більшість заданих параметрів дають можливість контролювати якість продукції відносно;

- узгодженість часу, витраченого на контроль, з часом роботи інших технічних засобів;

- високий ступінь достовірності результатів контролю;
- можливість механізації та автоматизації контролю технологічних процесів і здійснення контролю за допомогою сигналів, що випромінюються контрольним обладнанням.

Основні сфери застосування неруйнівного контролю:

1. виявлення дефектів в особливо відповідальних вузлах і устаткуванні (ядерні реактори, літаки, підводні та надводні плавучі засоби, космічні апарати тощо);
2. виявлення дефектів у вузлах та устаткуванні, які тривалий час експлуатуються (портові споруди, мости, крани, атомні електростанції, котли, супутники);
3. виявлення дефектів в особливо відповідальних вузлах і устаткуванні (атомні, теплові котли, котли електростанцій);
4. безперервна дефектоскопія і контроль підземних робіт;
5. дослідження дефектів у матеріальних конструкціях і виробках для технологічного вдосконалення.

1.2 Основні види неруйнівних методів контролю (НМК)

Класифікація методів неруйнівного контролю проводиться за різними критеріями [9]. Залежно від ступеня проникнення в матеріал усі види неруйнівного фізичного контролю можна умовно розділити на дві категорії: поверхневі та об'ємні. До поверхневих видів неруйнівного контролю (методів) належать ті, які можуть виявляти тільки ті дефекти, що доступні на матеріальній поверхні об'єкта, доступного для контролю.

Об'ємні типи (методи) неруйнівного контролю - це ті, які дають змогу виявити переважно дефекти всередині матеріалу, а поверхневі дефекти виявляють тільки за їхнього достатнього розміру.

Залежно від принципу дії всі методи неруйнівного контролю можна поділити на акустичні (ультразвукові), капілярні, магнітні (або магнітокеровані), оптичні (видимі оптичні), радіаційні, радіо-, теплові, течепошукові, електричні, електромагнітні та струмові (вихорострумові).

Акустичні методи засновані на реєстрації коливань, що збуджуються або генеруються в контрольованому об'єкті. Їх використовують для виявлення поверхневих і внутрішніх дефектів (наприклад, несучільностей, структурних неоднорідностей, міжкристалічної корозії, склеювання, паяння, зварювання) у деталях і виробих із різних матеріалів. Це дає змогу контролювати фізико-механічні властивості металів і металевих виробів, а також геометричні параметри з односторонніми допусками щодо виробу, не руйнуючи його. Нині розроблено і застосовують резонансний, тіньовий, ехоімпульсний, імпедансний, емісійний і метод вільних коливань. Ці методи також називають ультразвуковими.

Капілярні методи засновані на капілярному проникненні крапель індикатора в порожнини поверхневих дефектів. Під час використання цих методів на поверхню деталі, що очищається, наноситься проникаюча рідина, яка заповнює порожнину поверхневого дефекту. Потім рідину видаляють, а рідину, що залишилася в порожнині дефекту, виявляють за допомогою розчину проявника, який формує індикаторний малюнок. Капілярні методи застосовуються в широкому діапазоні позитивних і негативних температур у польових, цехових і лабораторних умовах. Капілярні методи дають змогу виявляти тріщини. Ці методи можуть застосовуватися для виявлення дефектів у металевих і неметалевих деталях із простою або складною геометрією.

Магнітні методи контролю засновані на реєстрації розсіяного магнітного поля, що виникає над дефектом, або на вимірюванні магнітних властивостей виробу, що перевіряється. Ці методи дають змогу виявити такі дефекти, як несучільності в матеріалі (тріщини, волосяні лінії, точкові пошкодження), а також визначити механічні властивості феромагнітних сталей і чавунів за зміною їхніх магнітних властивостей.

Візуально-оптичні методи контролю засновані на взаємодії світлового випромінювання з об'єктом контролю (ОБ). Залежно від характеру взаємодії розрізняють методи світлового випромінювання, що проходить, відбитого, розсіяного та індукованого світла (під останнім розуміють світлове випромінювання об'єкта під впливом зовнішніх чинників, наприклад, люмінесценцію).

До інформаційних параметрів цих методів належать амплітуда, фаза, поляризація, частота або частотний спектр, час проходження світла через об'єкт і форма заломлення або відбиття випромінювання. Оптичні методи контролю набули широкого поширення завдяки різноманітності способів отримання первинної інформації про наявність зовнішніх дефектів, незалежно від матеріалу, з якого виготовлений виріб, що перевіряється.

Радіологічні методи контролю ґрунтуються на реєстрації та аналізі іонізуючого випромінювання, що проходить; використовуються рентгенівські промені, гамма-промені і потік нейтронів. Випромінювання, що проходить через товщу виробу, по-різному послаблюється в дефектних і недефектних зонах і передає інформацію про внутрішню структуру матеріалу і наявність або відсутність дефектів усередині виробу. Ці методи використовують для контролю зварних швів, паяних з'єднань, виливків і прокату.

Радіочастотні методи засновані на реєстрації параметрів високочастотних електромагнітних хвиль, що взаємодіють з КК. Хвилі в діапазоні надвисоких

частот (НВЧ) 1-100 мм зазвичай використовують для контролю виробів із матеріалів, що погано послаблюють радіохвилі, таких як діелектрики (пластмаси, кераміка, скловолокно), магнітні діелектрики (ферити), напівпровідники і тонкостінні метали. Як і у випадку з оптичними та акустичними методами, існують методи пропускання, відбиття, розсіювання і резонансу.

Теплові методи засновані на реєстрації змін теплового або температурного поля тіла [10]. Вони можуть бути застосовані до будь-якої речовини.

Розрізняють пасивні методи (коли на об'єкт не впливає зовнішнє джерело тепла) і активні (коли об'єкт нагрівається або охолоджується). Вимірюваними інформаційними параметрами є температура або тепловий потік. Пасивні методи вимірюють температурне поле об'єкта в процесі експлуатації. Дефекти визначають за появою місць, де температура підвищується (або знижується). Цей метод використовується для виявлення витоків тепла в будівлях, тріщин у двигунах тощо.

За активного методу контролю об'єкт нагрівається контактним або безконтактним способом і вимірюється температура тієї чи іншої сторони об'єкта. Це дає змогу виявити структурні зміни фізико-механічних властивостей матеріалу через наявність переривчастих поверхонь об'єкта (тріщин, порожнин, сторонніх предметів), зміни теплопровідності, теплоємності та коефіцієнта теплопередачі. Вимірювання температури і теплового потоку можуть проводитися контактним і безконтактним способами. Найефективнішим безконтактним способом спостереження є скануюча інфрачервона термографія. Вона використовується для виявлення таких дефектів, як паяння і клейові з'єднання в багатошарових металевих і неметалевих виробах.

Контроль витоків - це метод виявлення рідин і газів, що проникають через дефекти в обладнанні. Він використовується для контролю герметичності зварювальних посудин, балонів, трубопроводів, паливного та гідравлічного

обладнання, масляних систем електростанцій тощо. Методи виявлення витоків включають гідравлічне опресовування, метод аміачного індикатора і контроль за допомогою гелієвих і галоїдних течношукачів. Також виявлення витоків може здійснюватися за допомогою радіоактивних матеріалів, що значно підвищує чутливість методу.

Електричні методи ґрунтуються на реєстрації параметрів електричного поля, що взаємодіє з СО (власне електричний метод), або електричного поля, що виникає в СО в результаті зовнішніх впливів (термоелектричний або фрикційний електричний метод).

Основним інформативним параметром є електрична ємність або потенціал. Ємнісні методи використовують для контролю діелектричних і напівпровідникових матеріалів. Зміна провідності, особливо її реактивної частини, використовується для контролю хімічного складу пластмас і напівпровідників, їхньої невідповідності, вологості сипучих матеріалів та інших властивостей [3]. Потенційні методи використовуються для контролю провідників. Товщина провідного шару і наявність розривів біля поверхні провідника контролюються шляхом вимірювання різниці потенціалів на фіксованій площі. Струм огинає поверхневий дефект, і глибина поверхні розриву визначається з похибкою в кілька відсотків зі збільшення різниці потенціалів у ділянці дефекту.

Термоелектричні методи використовують для контролю хімічного складу матеріалів. Наприклад, мідний електрод, нагрітий до певної температури, притискають до поверхні виробу і за різницею потенціалів, що виникає, визначають склад матеріалу - сталі, титану, алюмінію тощо.

Електронно-емісійний метод вимірює іони, що виділяються з поверхні виробу під впливом внутрішніх напружень. Метод використовується для

виявлення тріщин в емальованих покриттях, сортування деталей, вимірювання товщини покриттів і визначення ступеня загартування виробів.

Електромагнітний метод (метод вихрових струмів) ґрунтується на реєстрації змін взаємодії між електромагнітним полем котушки та електромагнітним полем вихрових струмів, що наводяться в контрольному пристрої цією котушкою. Він використовується для виявлення поверхневих дефектів на магнітних і немагнітних деталях і напівфабрикатах. Метод дає змогу виявляти переривчасті поверхні (переважно тріщини) на деталях різної геометрії.

Першим етапом завжди є візуальний контроль. Це пов'язано з тим, що якщо об'єкт має неприйнятні пошкодження, які явно не підлягають усуненню, то інші, більш трудомісткі та дорогі процедури не мають сенсу. Якщо об'єкт не вийшов з ладу за результатами всіх попередніх процедур, у деяких випадках необхідно дослідити матеріал руйнівними методами (хімічний аналіз, металографічні та механічні випробування).

Якщо це передбачено програмою діагностики і результати руйнівних випробувань позитивні, то подальшому неруйнівному контролю підлягають не тільки нормативно регламентовані ділянки та елементи, а й відновлені ділянки відбору проб (зразків). Тому неруйнівний фізичний контроль завжди проводять в останню чергу. Як правило, процедури неруйнівного контролю містять щонайменше два методи: поверхневий і об'ємний.

Поверхневий метод використовується перед об'ємним, оскільки він простіший у виконанні, а об'ємний метод проводять, коли за результатами поверхневого методу немає ознак неприпустимих дефектів. Позитивні висновки за результатами всіх діагностичних процедур робляться тільки за відсутності протипоказань, при цьому за кожним видом контролю (методом) робляться окремі висновки.

Процедури контролю на небезпечних виробничих об'єктах можуть проводитися фахівцями, які пройшли навчання та акредитацію відповідно до вимог «Положення про акредитацію персоналу в галузі неруйнівного контролю», і для цього типу об'єктів висновки можуть робити особи, які мають кваліфікацію заданим методом не нижче II рівня [8]. Лабораторії, що здійснюють діагностику, мають бути акредитовані відповідно до вимог «Положення про акредитацію лабораторій неруйнівного контролю».

1.3 Ефективність неруйнівних методів контролю (НМК)

Ефективність неруйнівного контролю визначається низкою факторів, включно з виявленням дефектів, продуктивністю, ефективністю, безпекою та вартістю. Візуальний і капілярний контроль виробів із феромагнітних матеріалів дає змогу виявити дефекти тільки на поверхні виробу. Магнітні та струмонапружені методи дають змогу виявити як поверхневі, так і підповерхневі дефекти.

Радіологічні та акустичні методи дають змогу виявити поверхневі, підповерхневі та внутрішні дефекти. Радіаційні методи розрізняються за ступенем небезпеки для обслуговуючого персоналу. Капілярний метод і метод випробування на герметичність володіють певною токсичною дією у разі використання деяких випробувальних матеріалів і ультрафіолетових опромінювачів. Решта методів неруйнівного контролю не мають істотного впливу на здоров'я обслуговуючого персоналу. З погляду автоматизації контролю найбільшу перевагу віддають вихрострумовим методам, магнітним методам із

ферорезонансними, індукційними та аналогічними типами перетворювачів, радіаційним методам і деяким видам теплових методів.

Основними перевагами цих методів є відсутність безпосереднього контакту між перетворювачем і виробом і можливість отримання інформації про дефекти у вигляді показань приладів. У цьому відношенні ультразвукові методи контролю вимагають контакту між датчиком і виробом, наприклад, через шар води. Складність автоматизації інших методів контролю полягає в тому, що інформація про дефекти повинна оброблятися візуально: рентгенівський метод і метод виявлення витоків є одними з найдорожчих методів контролю з точки зору витрат на контроль. Це пов'язано з тривалістю інспекційних робіт і капітальними вкладками, необхідними для будівництва об'єктів і обладнання. Наприклад, при порівнянні вартості радіографічного та ультразвукового контролю зварних з'єднань товщиною 10-20 мм ультразвуковий контроль у три-п'ять разів дешевший за радіографічний. Ця перевага зростає в міру збільшення товщини зварного з'єднання.

1.4 Сутність акустичного методу вільних коливань

Акустичний метод вільних коливань ґрунтується на збудженні вільно загасаючих пружних коливань широкого діапазону частот у контрольованій зоні виробу та реєстрації зміни спектрів прийнятих сигналів на дефектних ділянках порівняно зі спектрами, що спостерігаються на доброякісних ділянках. Розрізняють інтегральний та локальний методи вільних коливань, що застосовуються відповідно до всього контрольованого виробу або його частини.

Метод вільних коливань є приладовим варіантом методу простукування, в якому суб'єктивний індикатор коливань (вухо оператора) замінено на об'єктивний (приймач і спектроаналізатор). Застосування апаратури для реєстрації та аналізу прийнятого сигналу дозволяє значною мірою виключити суб'єктивність оцінки результатів контролю, властиву методу простукування.

Ознакою дефекту під час контролю методом вільних коливань є змін форми і ширини амплітудного спектра при переміщенні перетворювача дефектоскопа в зону дефекту.

Порушення пружних коливань у контрольованому виробі під час роботи дефектоскопами, що серійно випускаються, здійснюється шляхом періодичних ударів бойка електромагнітного вібратора перетворювача по поверхні виробу. Спектр збуджуваних імпульсів значною мірою залежить від пружних властивостей та інших параметрів виробу, що контролюється, а також від параметрів збуджуючого коливання електромагнітного пристрою.

Приєм пружних коливань здійснюється за допомогою п'єзоелектричного приймача або мікрофона.

П'єзоприймачі контактують з контрольованим виробом та сприймають пружні коливання безпосередньо від виробу. Мікрофонні приймачі сприймають коливання через повітря.

Недоліками п'єзоприймачів є нерівномірність амплітудно-частотної характеристики і схильність до фрикційних шумів, що виникають при переміщенні перетворювача по шорсткої поверхні виробу. Перевага мікрофонів перед п'єзоприймачами є безконтактність і несхильність до фрикційних шумів, недоліком - чутливість до зовнішніх акустичних шумів, що утруднює, а іноді і виключає застосування перетворювачів з мікрофонами.

Акустичні сигнали перетворюються приймачем перетворювача на електричні, обробка яких здійснюється в електронному блоці дефектоскопа.

Метою обробки інформації є виявлення та виділення зміни спектра прийнятих сигналів, що є інформативним параметром методу вільних коливань. Так як приймач пружних коливань вносить неминучі спотворення, спектр електричних сигналів на вході підсилювача дефектоскопа відрізняється від вихідного спектра коливань виробу.

Найбільшу інформативність мають багатоканальні системи обробки сигналів, що використовують принцип одночасного аналізу спектра. Така система, застосована в дефектоскопах АД-50У та АД-60С, дозволяє оцінювати зміни спектра відразу у всьому діапазоні робочих частот. До виходів каналів багатоканальної системи підключено лінійні газорозрядні індикатори, що візуалізують спектр прийнятого сигналу. Автоматичний сигналізатор дефектів управляється сумою напруги на виходах каналів, що вибираються оператором на підставі показань спектроаналізатора і несуть найбільшу інформацію про дефекти.

Процес перетворення спектра системою "перетворювач-контрольований виріб".

Спектр $\dot{S}(\omega)$ прийнятого сигналу (на виході перетворювача дефектоскопу) визначається як

$$\dot{S}(\omega) = \dot{S}_0(\omega)\dot{K}(\omega), \quad (1.1)$$

де $\dot{S}(\omega)$ - спектр імпульсу, що формується при ударі бойка по поверхні контрольованого виробу;

$\dot{K}(\omega)$ - узагальнений коефіцієнт передачі акустичного тракту (виробу) та приймача перетворювача.

Точки над символами позначають, що ці значення є комплексними величинами. Коефіцієнт \dot{K} залежить від параметрів виробу, особливо його

контрольованої ділянки, а також від параметрів приймального перетворювача. Узагальнений коефіцієнт передачі \dot{K} може бути представлений у вигляді

$$\dot{K}(\omega) = \dot{Y}(\omega)\dot{P}(\omega), \quad (1.2)$$

де $\dot{Y}(\omega)$ - коефіцієнт передачі виробу,

$\dot{P}(\omega)$ - коефіцієнт передачі приймача перетворювача.

Коефіцієнт $P(0)$ охоплює також ділянку акустичного тракту, що зв'язує власне перетворювач з контрольованим виробом та вхідний електричний ланцюг підсилювача. При застосуванні п'єзоелектричного приймача такою ланкою є гнучкість зони контакту з виробом, у разі мікрофонного приймача - повітряний проміжок між мікрофоном і виробом.

Коефіцієнт $\dot{P}(\omega)$ охоплює також ділянку акустичного тракту, що зв'язує власне перетворювач з контрольованим виробом та вхідний електричний ланцюг підсилювача. При застосуванні п'єзоелектричного приймача такою ланкою є гнучкість зони контакту з виробом, у разі мікрофонного приймача - повітряний проміжок між мікрофоном і виробом.

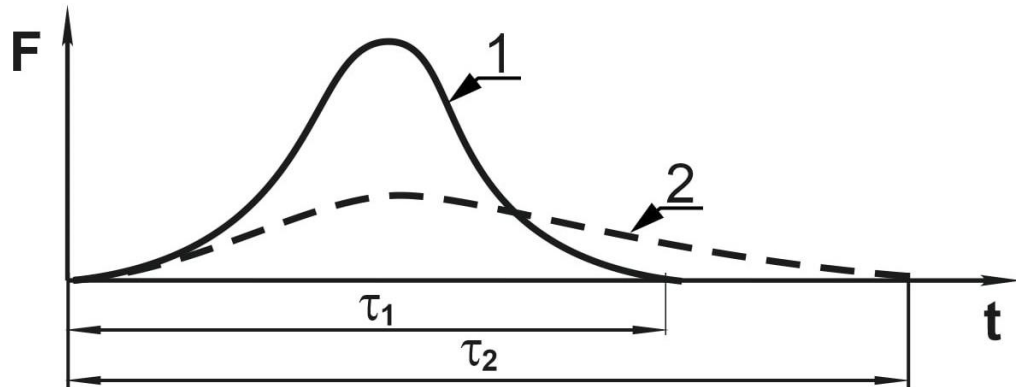
Імпульс сили, що впливає на виріб при ударі по поверхні бойка електромагнітного вібратора, може мати різну форму. Так, при контролі виробів із шаруватих пластиків (найбільш типовий випадок використання методу вільних коливань) форму ударно збуджуваних імпульсів можна апроксимувати функцією

$$F(t) = F_m \sin^2 \frac{\pi t}{\tau}, \quad (1.3)$$

де F_m - амплітуда сили,

t – час;

τ - тривалість зіткнення ($0 \leq t \leq \tau$)



1 - у доброякісній зоні виробу; 2 - на дефектній ділянці

Рисунок 1.1 - Імпульси сили, що впливають на виріб при ударі бойка електромагнітного вібратора на його поверхні.

Амплітуда спектральної щільності імпульсу, що описується виразом (3) може бути представлена у вигляді

$$S_0(f) = F_m \tau \left| \frac{\sin(\pi f \tau)}{\pi f \tau [1 - (f \tau)^2]} \right|. \quad (1.4)$$

Зі зростанням частоти амплітуди спектральних складових різко зменшується

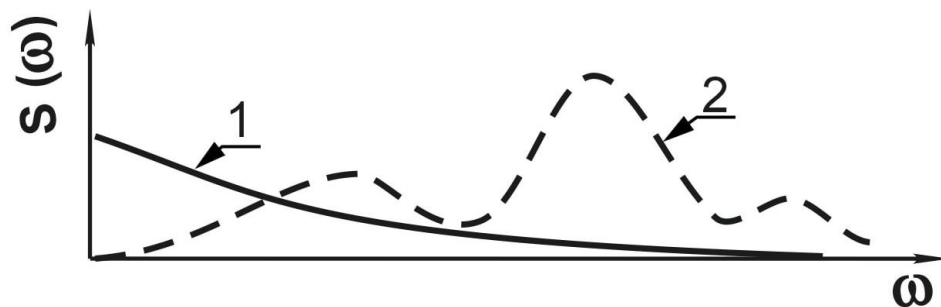


Рисунок 1.2 – Спектри вільних коливань контрольованої ділянки виробу у доброякісній (1) та дефектній (2) зонах

Дефект у вигляді розшарування або порушення з'єднання між шарами виробу можна розглядати як закріплену по контурі пластину. У загальному випадку умови закріплення по контуру відокремленого дефектом шару не можна звести до жодного з трьох типових випадків (стиснута, оперта і вільна на краях пластина), тому аналітичне рішення задачі про власні коливання відокремленого дефектом шару важко. Лише у випадках неглибоко розташованих великих дефектів останні можуть розглядатися як затиснуті по контуру пластини. Основна частота затиснутої по контуру пластини діаметром D і товщиною h визначається виразом

$$f_0 = \frac{6,5h}{D^2} \sqrt{\frac{E}{12(1-\nu^2)\rho}}, \quad (1.5)$$

де E , ν і ρ - модуль Юнга, коефіцієнт Пуассона та щільність матеріалу пластини відповідно.

Величина f із зростанням h та E та зменшенням D та ρ збільшується.

Таким чином, параметри імпульсів, що збуджуються при ударі бойка електромагнітного вібратора по виробу (амплітуда, тривалість і форма), значною мірою залежать від характеристик виробу, що контролюється. Зменшення товщини виробу або наявність у ньому дефекту, що призводять до зменшення механічного імпедансу виробу, а також зменшення амплітуди імпульсу, збільшення тривалості та зменшення ширини спектра.

РОЗДІЛ 2

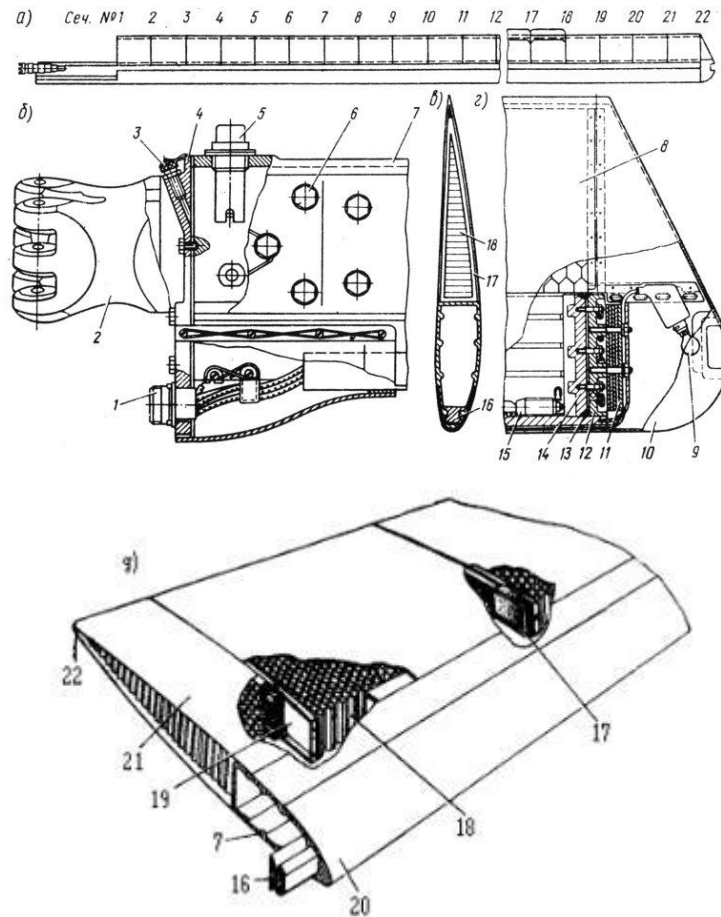
МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єктом дослідження є лопать несучого гвинта вертольоту Ми-8 та його модифікацій



Рисунок 2.1 - Вертольот Ми-8МСБ та Ми-8МСБ-В

2.1 Конструкція лопаті несучого гвинта



а - загальний вигляд лопаті несучого гвинта; б - комлева частина лопаті; в - переріз лопаті; г - кінцева частина лопаті; д-типовий відсік лопаті 1-штепсельний роз'єм; 2- наконечник; 3 - вентиль; 4 - заглушка; 5- сигналізатор тиску; 6 - болт; 7- лонжерон; 8 - хвостовий відсік; 9 - лампа контурного вогню; 10 - кінцевий обтічник; 11 - балансувальні пластини; 12 - заглушка; 13 - гумовий вкладиш; 14 - притиск; 15 - гвинтовий упор; 16 - противаги; 17 - ущільнювальний вкладиш; 18 - стільниковий заповнювач; 19 - нервюра; 20 - нагрівальні елементи протильодової системи; 21 - обшивка; 22 - стрінгер.

Рисунок 2.2 – Конструкція лопаті несучого гвинта

Лонжерон є основним елементом міцності лопати і виготовляється з алюмінієвого сплаву АВТ-1. Внутрішня частина має постійний перетин, а зовнішня являє собою порожнисту балку, оброблену за заданою формою. До носової частини в середині лонжерона прикріплені протифлатерні вантажі. Порожнина всередині лонжерона закрита кінцевою і торцевою заглушками. У торцеву заглушку угвинчений золотник, через який закачується азот з надлишковим тиску 0,025...0,08 Н/см². Цей тиск не обхідний для активації візуального індикатора пошкодження герметичної конструкції лопати. Візуальний індикатор пошкодження угвинчується в комлеву частину лонжерону. Індикатор складається з червоного циліндра, з'єднаного з сильфонним датчиком, і дюралюмінієвої склянки з прозорою кришкою.

Нагрівальні елементи проти обмерзальної системи (ПОС) розташовані по всій довжині лопати і 15% по хорді. Ці нагрівальні елементи прокладені та скріплені тонкими стрічками з нержавіючої сталі між шарами скловолокна [4]. Для захисту від стирання пакет нагрівальних елементів вкритий листовою гумою, а кінцевій частині лопати обшитий нержавіючою сталлю. Усі нагрівальні елементи розділені на три секції: одна нагріває верхню частину лопати, друга - кінцеву частину, третя - нижню частину лопати. Відсіки утворюють хвостову частину лопати. Кожен відсік склеєний із зовнішньої обшивки, стільникового наповнювача, двох нервюр і хвостового стрингера. Відсіки приклеєні до полиць та задньої стінки лонжерона. Для запобігання витоку азоту між відсіками встановлено гумову прокладку. У відсіках 17 і 18 встановлено тримерні пластини для регулювання конусності гвинта. Кінцевий обтічник складається з двох частин. Передня частина кріпиться гвинтами і може бути знята для доступу до балансувальної пластини для вирівнювання статичного моменту лопатей. Наконечник виготовлений зі сталі і кріпиться болтами до комлевої частини

лонжерона. Вона використовується для кріплення лопаті до корпусу осьового шарніра.

2.2 Акустичний контроль лопатей несучого гвинта

Акустичний контроль лопатей несучого гвинта є важливим методом неруйнівного тестування в авіаційній промисловості [8]. Цей метод дозволяє виявити внутрішні дефекти, такі як тріщини, розшарування та пористість, які можуть бути невидимими для візуального огляду. Застосування ультразвукового контролю забезпечує підвищення надійності та безпеки експлуатації вертольотів, оскільки дозволяє своєчасно виявляти та усувати потенційні проблеми в конструкції лопатей.

Процес контролю лопатей несучого гвинта включає кілька етапів. Спочатку поверхня лопаті ретельно очищується та підготовлюється для тестування. Потім на поверхню наноситься спеціальний гель або рідина для забезпечення акустичного контакту між датчиком та лопаттю. Датчик переміщується по поверхні лопаті, випромінюючи звукові хвилі та приймаючи відбиті сигнали.

Отримані дані обробляються комп'ютерними системами, які створюють детальні зображення внутрішньої структури лопаті. Ці зображення аналізуються кваліфікованими фахівцями, які можуть виявити навіть найменші відхилення від норми. Такий підхід дозволяє не тільки виявляти існуючі дефекти, але й прогнозувати потенційні проблеми, що можуть виникнути в майбутньому.

Регулярне проведення контролю лопатей несучого гвинта є критично важливим для забезпечення безпеки польотів. Це дозволяє виявляти дефекти на

ранніх стадіях їх розвитку, коли вони ще не становлять серйозної загрози для цілісності конструкції. Своєчасне виявлення та усунення таких дефектів значно знижує ризик катастрофічних відмов під час експлуатації вертольота [2].

Крім того, акустичний контроль є економічно ефективним методом, оскільки дозволяє оптимізувати графік технічного обслуговування та ремонту лопатей. Замість заміни компонентів за фіксованим графіком, можна проводити ремонт або заміну тільки тих елементів, які дійсно цього потребують, що значно знижує експлуатаційні витрати.

Таким чином, акустичний контроль лопатей несучого гвинта є невід'ємною частиною системи забезпечення якості та безпеки в авіаційній промисловості. Цей метод не тільки підвищує надійність вертольотів, але й сприяє загальному розвитку технологій неруйнівного контролю, що знаходять застосування в різних галузях промисловості.

2.3 Задіяна апаратура під час дослідження

Для досліджень використовувався акустичний дефектоскоп АД-60К [6] (рис. 2.3).



Рисунок 2.3 - Зовнішній вигляд дефектоскопу АД-60К

2.3.1 Робочі стандартні зразки для налаштування дефектоскопу

Для вибору режимів контролю та визначення чутливості методу та періодичної перевірки налаштування працездатності дефектоскопа необхідні робочі стандартні зразки (РСЗ) (рис. 2.4) зі штучними або природними дефектами різних розмірів. Ці РСЗ повинні мати самі основні параметри як і контрольований виріб (товщину і матеріал обшивки з'єднаних з нею елементів, розмірів стільникового заповнювача і т.п.). Довжина та ширина РСЗ можуть бути меншими, ніж відповідні розміри виробів, але не менше ніж 300x300 мм. Допускається використовувати РСЗ таких розмірів, як і контрольований об'єкт.

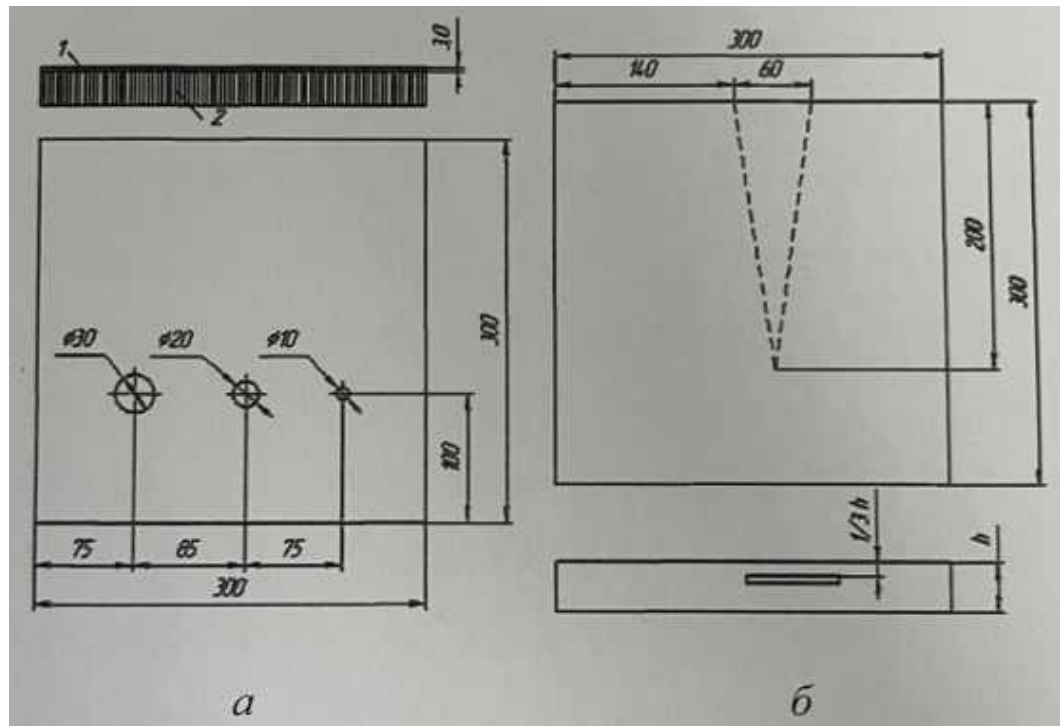
Штучні дефекти можуть бути виконані:

- шляхом закладання в РСЗ фторопластової плівки завтовшки 0,1 мм;
- шляхом закладання тонкої пластинки товщиною 0,1 мм клиноподібної форми з корозійностійкої сталі, змащеною антиадгезійним складом, з подальшим її вилученням;
- шляхом висвердлювання отворів різних діаметрів у нижньому листі до склеювання або вифрезерування глухих отворів після склеювання.

Штучні дефекти повинні закладатися на різній глибині по товщині багат шарової конструкції.

Розміри дефектів РСЗ слід вибирати, виходячи з норм допустимих дефектів і очікуваної чутливості методу на виробках даного типу. Контури дефектів на поверхні контрольованого зразка відзначити фарбою.

Дефекти в РСЗ, показані на малюнку 2.4 (а) - виконані шляхом заниження заповнювача, а в РСЗ на малюнку 2.4 (б) - шляхом закладання фольги з корозійностійкої сталі.



а - РСЗ тришарової (складової) конструкції: 1 - обшивка, 2 - стільниковий заповнювач;

б - РСЗ двошарової конструкції типу "лист-лист" (h - товщина зразка, що відповідає товщині контрольованого виробу)

Рисунок 2.4 - Ескізи робочих стандартних зразків із штучними дефектами.

2.3.2. Підготовка до роботи і налаштування дефектоскопу

Перед початком роботи необхідно заземлити корпус дефектоскопа через заземлену клему, розташовану на задній стінці приладу [6].

Включити вилку шнура живлення дефектоскопа в мережу з напругою 220 В та частотою 50 Гц.

Вибрати та підключити до дефектоскопу перетворювач. Імпедансний метод акустичного контролю може бути реалізований за допомогою поєднаного (СП або SP) або роздільно-сумісного перетворювача (PCП або RSP).

Принцип роботи PCП-перетворювача

В одному з двох вібраторів, навантажених на контрольований виріб, збуджують імпульс акустичних коливань, який, пройшовши від точки введення коливань, приймається приймальним вібратором у точці прийому. частотою Амплітуда імпульсу прийнятих коливань є функцією багатьох параметрів, таких як: добротність вібраторів, амплітуди збудливого імпульсу, сили притискання вібраторів до виробу коливань судять про дефектність виробу.

Роздільно-сумісний перетворювач PCП призначений для виявлення дефекту типу «непроклей» та «розшарування» на глибині залягання:

- у металевих конструкціях – 0,50...20,00 мм;
- у конструкціях з ПМК – 0,15...8,00 мм.

Перетворювач не застосовується для виявлення дефектів в стільникових конструкціях з розміром сотень більше 6 мм.

Не існує однозначної методики на вибір типу датчика для контролю нового об'єкта.

Виявлення дефекту

Рівень сигналу на екрані дефектоскопа більший на доброякісній ділянці конструкції.

Дефекти виявляють у негативному режимі, тобто зменшення сигналу на дефекті з глибиною залягання до 1,00 мм.

Примітка - Тип перетворювача вибирається з урахуванням параметрів контрольованого виробу та умов контролю.

2.3.3 Методика контролю

Перед проведенням контролю необхідно ретельно очистити від пилу та бруду поверхні зразка та виробу, що підлягає перевірці. Необхідно стежити, щоб на цих поверхнях, а також на пластмасових накладках перетворювачів (ковзають по контрольованих виробках) не було твердих частинок (піску та інших абразивних матеріалів), які можуть пошкодити поверхні виробів, наприклад, подрпати анодне покриття на обшивках алюмінієвих сплавів.

При контролі перетворювач переміщують по поверхні виробу, спостерігаючи за сигнальною лампочкою, що знаходиться в перетворювачі.

Перетворювач по поверхні контрольованого виробу слід переміщати з легким натиском, щоб вібратор повністю входив у корпус, а перетворювач спирався на пластмасову накладку. У цьому швидкість переміщення має перевищувати 10 м/хв. При контролі виробів з неплоскими поверхнями необхідно стежити, щоб відхилення осі перетворювача від перпендикуляра до поверхні виробу, що контролюється, було не більше $5...7^\circ$.

Якщо виріб має шорстку поверхню, то при переміщенні перетворювача з'являється додаткова складова сигналу, обумовлена ударами контактного наконечника про нерівність поверхні. В результаті загальний рівень сигналу на виході підсилювача може бути більшим, ніж рівень сигналу нерухомого перетворювача в тих же умовах. Це тим помітніше, що вища швидкість руху перетворювача по обшивці і що більше шорсткість її поверхні.

Тому слід вибирати таку швидкість переміщення перетворювача, щоб це явище практично не було.

При сильній шорсткості поверхні плавне переміщення перетворювача може бути неможливим: у цьому випадку при контролі слід послідовно переставляти перетворювач по поверхні виробу з місця на місце.

Дефекти фіксуються по екрану дефектоскопа, а також включенням сигнальної лампочки, розташованої в перетворювачі.

Контури дефекту на поверхні виробу окреслювати м'яким олівцем за показаннями дефектоскопа. Контури дефекту відзначають центром перетворювача (орієнтуватися по надсічках на корпусі).

Кордони зазначеної зони зазвичай задовільно збігаються з дійсними межами дефекту. Якщо виріб має обшивку значної товщини або розшарування залягає на глибині, близькій до граничної глибини дефекту, що виявляється, то протяжність зазначеної зони виходить менше фактичної.

У разі змінної товщини виробу, коли рівень вихідного сигналу залежить від цієї товщини, налаштування приладу та контроль виробу проводиться по зонах, що мають приблизно однаковий рівень сигналу.

Якщо контроль виробу здійснюється не по всій поверхні, а в окремих зонах, рекомендується застосовувати пристрої, що обмежують переміщення перетворювача цими зонами.

Бракування виробів проводиться на підставі встановлених технічними умовами норм допустимих дефектів.

2.4 Можливості та особливості імпедансного методу

Імпедансний метод використовується у випадках, коли модуль пружності матеріалу, з боку якого здійснюється контроль, досить великий (метали,

склотекстоліт, дельта-деревина та ін.). Контроль з боку матеріалів з низьким значенням модуля (м'яка гума, пінопласт та ін) зазвичай неможливий.

При перевірці тришарових конструкцій, наприклад виробів з двома обшивками та заповнювачем між ними, реєструються в основному лише дефекти з'єднання внутрішнього елемента з обшивкою, з боку якої виконується контроль. Для повної перевірки виробу зазвичай потрібний контроль його з двох сторін.

Примітка - Іноді реєструються і дефекти з'єднання між протилежною обшивкою та заповнювачем (наприклад, при контролі стільникових конструкцій з обшивками з композиційних полімерних матеріалів і стільниками з поліамідного паперу).

Імпедансним методом зазвичай виявляються лише дефекти, що мають розкриття, достатнє для того, щоб відокремлений дефектом шар контрольованої конструкції мав можливість коливатися самостійно, окремо від решти конструкції. Ця особливість методу істотна, наприклад, при виявленні розшарування в склопластику, що залягають на малих (до 0,5...0,6 мм) глибинах, і контролю виробів з тонкими обшивками. Такі дефекти виявляються лише при слабкому притисканні перетворювача виробу. У разі більшого тиску в місці контакту розшарування «закривається», і виріб коливається як єдине ціле. Тому при великому тиску близькі до поверхні дефекти можуть бути пропущені.

Чутливість імпедансного методу залежить від умов його застосування і визначається параметрами самого контролюючого виробу, до яких належать:

- жорсткість обшивки або відокремленого дефектом шару виробу;
- модуль пружності внутрішнього елемента;
- співвідношення жорсткості обшивки або відокремленого дефектом шару та жорсткості всієї конструкції в цілому;
- шорсткість та кривизна поверхні виробу.

Збільшення жорсткості обшивки (або відокремленого дефектом шару), зменшення відношення жорсткості конструкції до жорсткості обшивки, збільшення шорсткості та кривизни поверхні виробу призводять до зниження чутливості методу.

При заданих параметрах обшивки найбільша чутливість досягається контролю виробів з товстими, суцільними металевими внутрішніми елементами.

Чинниками, що обмежують чутливість імпедансного методу є:

- розкид значень Z_H механічних імпедансів у бездефектних зонах виробу, що контролюється;
- пружний опір Z_K зони контакту перетворювача з виробом.

Розкид Z , обумовлений непостійністю товщини клейового шва, неоднорідностями виробу (не є бракувальними ознаками) та інтерференційними явищами, створює заважає фон, що утруднює виявлення дрібних дефектів. Вплив цього чинника є суттєвим при контролі виробів з будь-якими параметрами.

Пружний опір $Z_k = \frac{1}{j\omega K_k}$ (ω - кругова частота, K_k - контактна гнучкість) обумовлено невеликою площею дотику контактного наконечника перетворювача з контрольованим об'єктом. Через малу площу, зони наконечника і контрольованого об'єкта, прилеглі до області контакту, відчують значні пружні деформації. Таким чином, область контакту являє собою зосереджений пружний опір, через яке коливання передаються від перетворювача шукача до об'єкта, що контролюється.

Пружний опір Z_K зменшує чутливість перетворювача до зміни імпедансу виробу. Вплив Z_K істотно лише за контролі виробів із жорсткими внутрішніми елементами, котрим у доброякісних зонах $Z_K > \frac{|Z_H|}{2}$.

При $|Z_d| > |Z_K|$ (Z_d - імпеданс виробу дефектної зони) дефекти зазвичай виявляються, оскільки у разі імпеданс виробу мало впливає режим роботи перетворювача.

Гранична товщина обшивки, при якій ще доцільний контроль, за інших рівних умов тим менше, чим більший модуль пружності матеріалу.

Для конструкцій з гладкими обшивками в найбільш сприятливих умовах (жорсткий, суцільний внутрішній металевий елемент) мінімальний діаметр виявленого дефекту в міліметрах можна наближено оцінити за формулою

$$D_{min} = 0,1 \sqrt{\frac{Eh^2}{1-\mu^2}}, \quad (2.1)$$

де E — модуль пружності матеріалу обшивки, кгс/мм²;

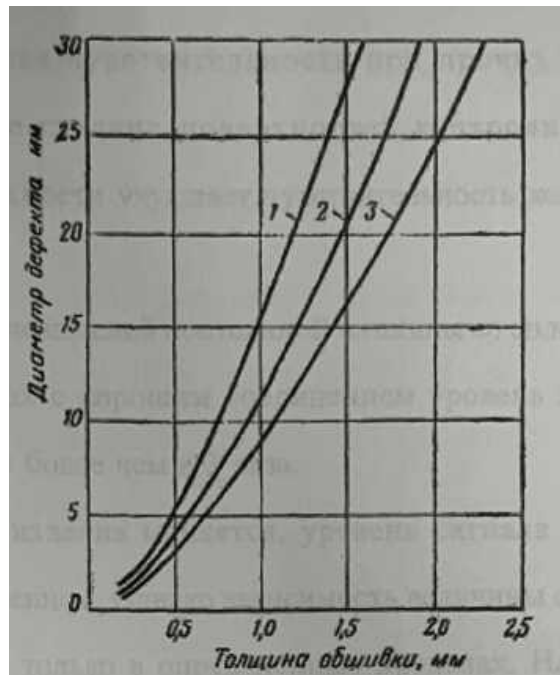
μ — коефіцієнт Пуассона;

h — товщина обшивки, мм.

Формула (2.1) справедлива для резонансного режиму налаштування за умови $D_{min} < 30$ мм.

На малюнку 2.4 наведені побудовані за формулою (2.1) криві, що дозволяють знайти мінімальний діаметр дефекту, що виявляється, в конструкціях з обшивками їх сталі, титанового і алюмінієвого сплавів.

З зменшенням модуля пружності внутрішнього елемента чутливість методу падає. Наприклад, у конструкціях із заповнювачем із пінопласту із щільністю $\rho = 200$ кг/м³ гранична товщина обшивки приблизно в 2 рази менша, ніж у виробках з металевим лонжероном.



1 — сталь; 2 — титановий сплав; 3 — алюмінієвий сплав.

Рисунок 2.5 - Залежність мінімального діаметра дефекту, що виявляється імпедансним методом у найбільш сприятливих умовах, від товщини обшивки.

Якість проведення контролю імпедансним методом залежить від відношення жорсткості всієї конструкції до жорсткості відокремленого дефектом шару було досить великим. При склеюванні двох шарів з однакового матеріалу контроль з'єднання виявляється можливим, якщо ці шари мають різну товщину, і перевірка виконується з боку тоншого шару. Контроль з'єднання між однорідними шарами однакової товщини (наприклад, двома металевими листами) методом імпедансу зазвичай неможливий.

Найбільша чутливість за інших рівних умов виходить у разі гладких поверхонь виробу, що контролюється. Шорсткість поверхні погіршує чутливість контролю.

При контролі виробів постійної товщини із суцільним внутрішнім елементом на ділянках з гарним з'єднанням рівень вихідного сигналу зазвичай змінюється не більше ніж у 3 рази.

Якщо товщина виробу змінюється, рівень сигналу змінюється, знижуючись з її зменшенням. Проте залежність величини сигналу від товщини виробу спостерігається лише певних межах. Починаючи з деякої критичної товщини, різної для конструкцій різних типів, показання приладу перестають залежати від неї.

У разі контролю конструкцій з внутрішнім елементом, що має періодичну структуру (стільниковий заповнювач, гофр тощо), середній рівень сигналу також залежить від товщини, хоча розкид показань на ділянках з доброякісним з'єднанням може бути значно більшим.

При контролі малогабаритних конструкцій, особливо металевих, присутня висока ймовірність значного розкиду показань дефектоскопа в зонах з гарною сполукою, обумовлений резонансними явищами у виробі. Зниження цього розкиду обумовлюється підбором робочої частоти роботи дефектоскопа.

2.5 Загальні рекомендації з контролю з'єднань між обшивкою та стільниковим заповнювачем.

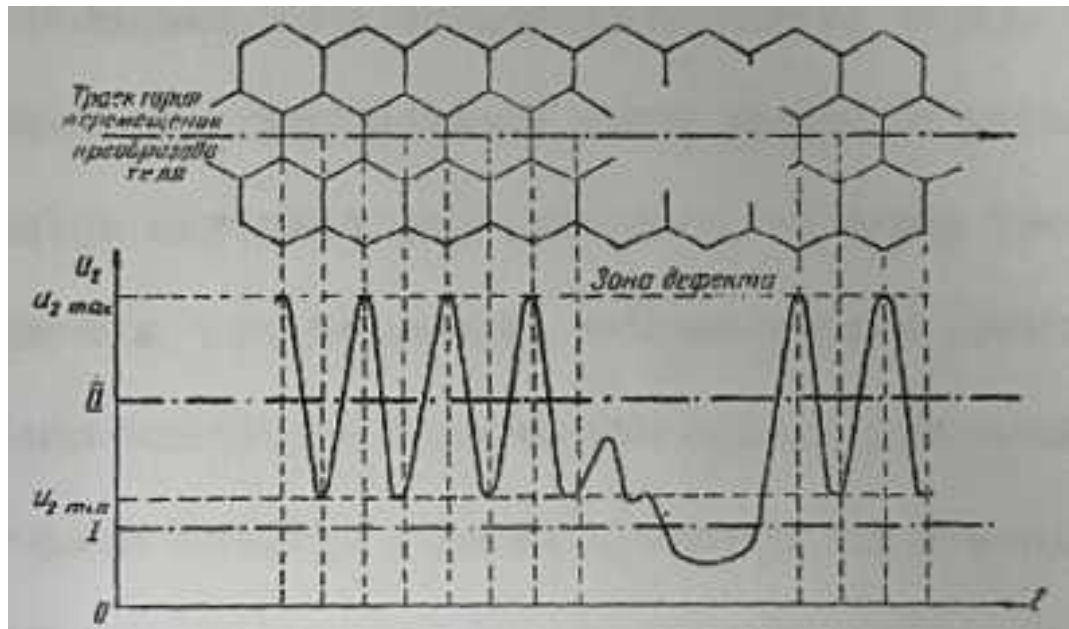
Імпедансний метод дозволяє виявляти дефекти з'єднань між обшивкою та заповнювачем у стільникових панелях з металевими та неметалевими обшивками та заповнювачами, у тому числі в паяних стільникових панелях. Гранична товщина обшивки, при якій контроль ще ефективний, становить алюмінієвий сплав 2 мм, для сталі 1,5 мм.

Примітка - Мінімальний розмір дефекту, що виявляється, не може бути менше розміру комірки стількового заповнювача.

Особливістю контролю конструкцій із стільниковим заповнювачем є періодична зміна Z_H у зонах доброякісного з'єднання. Значення Z_H мінімальні над центрами осередків та максимальні над їхніми вершинами. Відповідно змінюються модуль P (амплітуда U_2 та аргумент коефіцієнта передачі перетворювача). Якщо сигналізатор дефектів спрацьовує при рівні сигналу нижче зазначеного цифрою I, реєструються тільки дефектні зони (малюнок 2.6.(I)). При рівні II спрацьовування сигналізатора стільникові осередки реєструються як дефекти. Розкид показань у доброякісних зонах тим більше, чим менша жорсткість обшивки і більша комірка заповнювача. При несприятливих параметрах імпедансу виробу в дефектних зонах та над центрами осередків можна порівняти, що ускладнює контроль.

Іншою причиною помилкових показань дефектоскопа можуть бути ділянки зі зім'ятими стільниками (малюнок 2.6 (II)). Деформація стільників призводить до зниження жорсткості опори обшивки та зменшення механічного імпедансу. Тому зони зім'ятих стільників іноді можуть фіксуватися, як дефекти з'єднання.

Примітка - Щоб відрізнити непроклеї від зон підм'ятості стільників, слід повторно перевірити виріб у сумнівній зоні при підвищеному посиленні. При цьому зони непроклею фіксуються так само, як і за нормального посилення, проте їх розміри на діаграмі зменшуються. Зображення зон підм'ятості стільник при підвищеному посиленні стає більш щільним і періодичним і наближається до зображення нормального стільникового заповнювача.



I - рівень сигналу, що відповідає включенню бездефектної ділянки;

II - рівень сигналу, відповідний зоні підм'ятості стільників

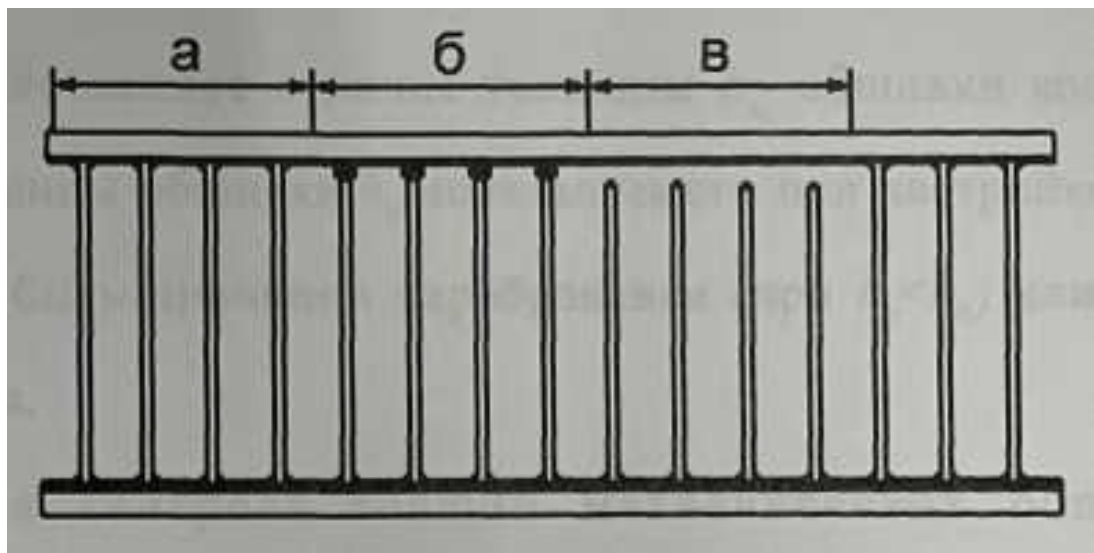
Рисунок 2.6 - Зміна рівня сигналу при переміщенні перетворювача по поверхні виробу зі стільниковим заповнювачем

При змінній товщині обшивки налаштування дефектоскопа різне. Якщо різниця в h відносно невелика, зазвичай достатньо лише посилення дефектоскопа (при зменшенні h посилення слід збільшити). При більшій різниці товщин обшивок може знадобитися також зміна робочої частоти.

Імпедансний метод дозволяє виявляти зони зниженої міцності склеювання обшивки зі стільниковим заповнювачем [5]. У більшості випадків зниження міцності склеювання в стільникових панелях обумовлено поганим припасуванням розмірів елементів, що з'єднуються. Якщо на ділянках доброякісного склеювання стільники прорізають клейову плівку і підходять впритул до обшивки, то в ослаблених зонах між стільниковим блоком та обшивкою існує заповнений клеєм зазор (див. малюнок 2.7). Так як модулі пружності клеїв відносно невеликі, зазор зменшує жорсткість опори обшивки і,

отже, механічний імпеданс конструкції. Тому в зонах зниженої міцності відбувається зменшення амплітуди та зміна фази прийнятого сигналу, проте ці зміни менші, ніж у зонах непоклеїв.

Для кількісної оцінки міцності клейової сполуки рекомендується будувати кореляційні криві «міцність – показання дефектоскопа». Такі графіки будуються на основі значної кількості вимірювань з подальшим визначенням істинної міцності шляхом механічних випробувань, що руйнують. Кореляційні криві виходять шляхом усереднення одержаних результатів.



а – зона доброякісного склеювання; б – зона зниженої міцності; в - зона порушення з'єднання (непоклею)

Рисунок 2.7 - Ослаблення клейового з'єднання обшивки зі стільниковим заповнювачем при поганому підганянні розмірів склеюваних елементів

Для оцінки міцності склеювання рекомендується користуватися диференціальними перетворювачами, які мають приблизно лінійну залежність P від x_n та $|Z_H|$, та застосовувати спосіб А-обробки сигналу.

При контролі стільникових панелей і особливо в оцінці міцності склеювання слід враховувати, що товщина h обшивки істотно впливає на показання дефектоскопа (зі збільшенням h показання зростають). Це особливо

важливо при контролі виробів з обшивками, обробленими методом хімічного фрезерування, коли допуски на товщину обшивки набагато більші, ніж при прокатці.

Істотна відмінність товщини $h_{\text{и}}$ обшивки контрольованого виробу від товщини обшивки h_0 , що використовується при налаштуванні стандартного зразка, може бути причиною перебракування (при $h_{\text{и}} < h_0$) або недобракування ($h_{\text{и}} > h_0$) виробу.

Для контролю товщин металевих обшивок можна використовувати ультразвукові або вихрострумові товщиноміри.

Розглянута вище періодична зміна механічного імпедансу у доброякісних зонах виробу характерна також для інших виробів із періодичною структурою внутрішнього елемента (наприклад, у вигляді гофру).

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ФАКТОРІВ НА ЯКІСТЬ ВИГОТОВЛЕННЯ ЛОПАТИ НЕСУЧОГО ГВИНТА

Для виявлення сумісного впливу технологічних факторів було прийняте рішення використати методику планування експерименту. Для більш глибокого дослідження обрали планування другого порядку за формулою 2^2 – тобто два фактори змінювали на двох рівнях з чотирма основними дослідями, дослідями у зіркових точках, а також на нульовому рівні. (табл. 3.1). При цьому незалежними змінними виступали: температура прогріву лопаті для полімеризації клею T_k , тому що визначає швидкість та ефективність реакції клею, $^{\circ}\text{C}$ та час витримки для повноти полімеризаційних процесів t , хвилин, тому як визначає, як швидко і ефективно клей затвердіє і як довго він буде зберігати свої властивості.

Таблиця 3.1 – Змінення факторів в інтервалах їх варіювання

Інтервали варіювання та рівні факторів		Фактори	
		Температура полімеризації T_k , $^{\circ}\text{C}$	Час витримки t , хв
Нульовий рівень: $X_0 = 0$		165	70
Інтервал варіювання	1,0	5	10
	1,682	8,41	16,82
Нижній рівень: $X = -1,0$		160	60
Верхній рівень: $X = +1,0$		170	80
Зіркові точки	$X = -1,682$	156,59	53,18
	$X = +1,682$	173,41	86,82

В якості функції відклику було обрано параметр критерія якості склеювання, а саме площа зафіксованих дефектів S , мм². Таблиця при плануванні експерименту (табл. 3.2) містить N експериментів на основних рівнях та експерименти на незмінному - нульовому рівні змінення факторів та зіркових точках:

$$N = 2^k, \quad (3.1)$$

де 2 - кількість рівнів варіювання факторів;

k - кількість факторів ($k = 2$), отже $N=4$, не враховуючи дослідів на нульовому рівні та зіркових точках.

Таблиця 3.2 – Змінення рівней дослідних факторів по типу центрального композиційного плану для повного факторного експерименту 2^2

№ дослідів	Кодовий масштаб		Натуральний масштаб		S , мм ²
	X_1	X_2	X_1 , (Т _к , °С)	X_2 , (t, хв)	
1	+	+	170	80	1600
2	-	+	160	80	800
3	+	-	170	60	1200
4	-	-	160	60	2400
5	+ 1,682	0	173,41	70	1558
6	- 1,682	0	156,59	70	3253
7	0	+ 1,682	165	86,82	1765
8	0	- 1,682	165	53,18	2749
9	0	0	165	70	250

Відповідно до вказаної таблиці проведення дослідів було проведено

досліди з різними рівнями факторів оптимізації: температури прогріву лопаті для полімеризації клею T_k , °C та часу витримки для повноти полімеризаційних процесів t , хв. Показники оцінювання якості у вигляді площини зафіксованих дефектів S наведені у таблиці 3.2. Аналіз отриманих результатів показав, що навіть не значне змінення досліджуваних факторів призведе до достатнього підвищення площини «непроклею», що напевно пов'язано з порушеннями реакції полімеризації при склеюванні.

Подальша регресійна обробка результатів, які були одержані при експерименті призвела до отримання рівняння функції відклику Y в залежності від факторів варіювання, а саме X_1 та X_2 у кодовому масштабі:

$$Y = B_0 + B_1 \cdot X_1 + B_2 \cdot X_2 + B_{12} \cdot X_1 \cdot X_2 + B_{11} X_1^2 + B_{22} X_2^2, \quad (3.2)$$

де Y – площа зафіксованих дефектів S , мм² виявлених на лопаті несучого гвинта,

B_0 – вільний член,

B_1 , B_2 , B_{12} , B_{11} , B_{22} – відповідні коефіцієнти регресії.

В результаті отримали наступні рівняння:

$$Y = 95,11746 - 16,5296 \times X_1 - 10,2752 \times X_2 - 3,5 \times X_1 \times X_2 - 18,5336 \times X_1^2 - 22,6005 \times X_2^2 \quad (3.3)$$

Проведена подальша перевірка на адекватність моделі показала, що дані значення можливо використовувати для прогнозування функцій відгуку. Це дає можливість перейти до натуральних значень нашої моделі. При цьому використовували формули переведу (8).

$$x_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\delta_{0i}}, \quad (3.4)$$

де x_i – функція у натуральному масштабі, X_i – функція у кодовому масштабі, X_{i0} – фактор на нульовому рівні, δ_{0i} – інтервал варіювання фактору X_i .

Після проведення вказаних математичних операцій отримали формули:

$$X_1 = \frac{T_k - 165}{5} \quad (3.5)$$

$$X_2 = \frac{t - 70}{10} \quad (3.6)$$

Після цього рівняння [3] прийняли наступний вид:

$$S = 937987,31 - 10196,18 \times T_k - 2607,90 \times t + 10,0 \times T_k \times t + 28,62 \times T_k^2 + 6,63 \times t^2 \quad (3.7)$$

Для виявлення зв'язку між фактичними значеннями результатів експерименту та математичними результатами розрахунки за отриманою математичною моделлю було визначено коефіцієнт кореляції за формулою:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{cp})(y_i - y_{cp})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{cp})^2 (y_i - y_{cp})^2}}, \quad (3.8)$$

де x_i та x_{cp} – це значення, які були отримані в результаті експерименту i -го дослідження й середнє значення усіх результатів експериментів (див. табл. 3.2), y_i та y_{cp} – це розрахункові величини, що відповідають i -му дослідженню за формулою (7), а також середні величини усіх розрахованих значень, порашованих за формулою (7).

Такі розрахункові процедури дозволили отримати коефіцієнт кореляції r на рівні 0,98. Така величина кореляції свідчить про значний математичний зв'язок

отриманих масивів даних експерименту та побудованої математичної моделі. Отже можемо казати, що це дозволяє прогнозувати високу якість склеювання композитних матеріалів лопаті, в залежності від T_k та t .

Графічне відображення побудованої математичної моделі (3.7) приведено на рис. 3.1.

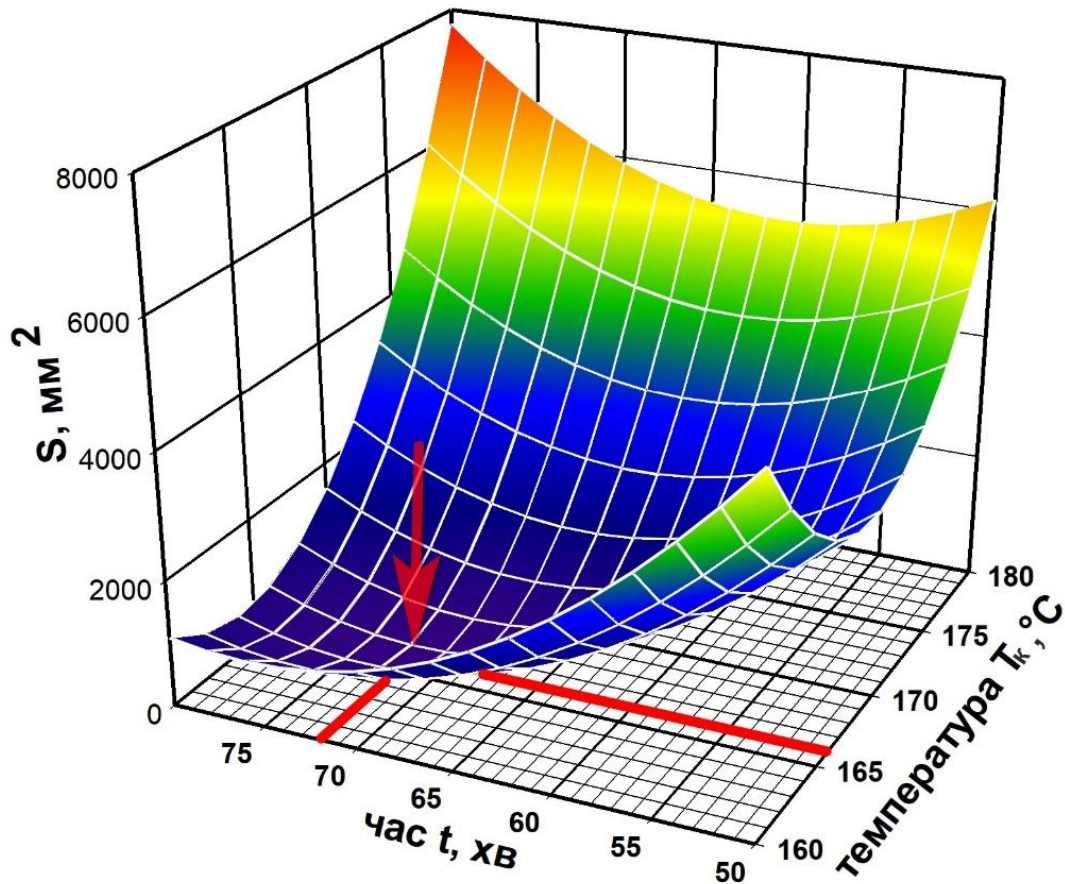


Рисунок 3.1 – Побудована математична модель залежності площини несклеювання композитного матеріалу лопаті гвинта S від температури прогріву лопаті для полімеризації клею t та часу витримки для повноти полімеризаційних процесів T_k у графічному вигляді.

Таке відображення моделі показує, що ми маємо справу з криволінійною залежністю другого порядку із присутнім мінімумом. Тож, для виявлення рівнів

факторів, при яких функція сягає мінімальних значень проводили дослідження її на екстремумами. В результаті такого дослідження виявили, що функція S (3.7) відповідає екстремумам у координатах $T_k = 166$ °C, а $t = 72$ °C і сягає величини $S = 221,27$ мм².

Таким чином, результати проведених досліджень вказують на те, що для отримання найбільшої якості виготовлення лопаті несучого гвинта з мінімальною площиною непоклею, досягаючи при цьому рівня $S = 221,27$ мм² необхідно виконувати наступні технологічні режими у операції склеювання:

1. Температура прогріву лопаті для полімеризації клею $t = 166$ °C;
2. Час витримки для повноти полімеризаційних процесів $T_k = 72$ хвилини.

ВИСНОВКИ

В результаті проведеного дослідження якості склеювання лопатей несучого гвинта були досягнуті наступні висновки та результати:

1. Розглянуто конструкцію лопаті несучого гвинта, як дуже важлива складальної одиниці в конструкції вертольота.

2. Оцінено ключові параметри, які впливають на міцність та довговічність склеювання лопатей, такі як вибір температури полімеризації та час полімеризації.

3. Коротко описано класифікацію та характеристики видів неруйнівного контролю. Визначено, що акустичний метод вільних коливань має практичну та економічну ефективність на виробництві. Має високий відсоток якості контролю при малій витраті часу на його проведення.

3. Проведено експериментальні дослідження з ключовими факторами склеювання лопаті, що впливають на ймовірність появи дефекту «непроклеювання», а саме температури прогріву лопаті для полімеризації клею та часу витримки для повноти полімеризаційних процесів.

Вияснили, що для отримання найбільшої якості виготовлення лопаті несучого гвинта з мінімальною площиною непроклею, яка може сягати рівня 221,27 мм² необхідно дотримуватися наступних технологічних вимог:

1. температура прогріву лопаті для полімеризації клею $t = 166\text{ }^{\circ}\text{C}$;
2. час витримки для повноти полімеризаційних процесів $T_k = 72$ хвилини.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Choi T. H., Nascimento A. C.: "Adhesion and Bonding of Aircraft Composite Materials": Наукова стаття.
2. Daniel R. E., Smith M. R.: "The Influence of Temperature on the Bonding Process of Adhesives in Aircraft Structures": Наукова стаття.
3. Дяченко С. С. Фізичні основи міцності та пластичності металів: Навч. посібник. – Харків: Видавництво ХНАДУ, 2003. – 226 с.
4. Mittal K. L., Hattori H. M. "Adhesion Science and Engineering: Surfaces, Chemistry and Applications": Elsevier, 2002 p. - 2014 с.
5. Soni H. M. K. "Adhesive Bonding: Science, Technology, and Applications": Монографія.
6. Acoustic impedance flaw detector AD-60K for aviation [Електронний ресурс] - Режим доступу до ресурсу: <https://intron-set.com.ua/product/ad-60k-novyj-akusticheskij-defektoskop/>
7. Pyas N. J., Caserio A. L. "Comprehensive Guide to Adhesive Bonding in Aerospace Applications": Практичний посібник, 2022 p. - 153 с.
8. ДСТУ EN ISO 9712:2014 Неруйнівний контроль. Кваліфікація та сертифікація персоналу неруйнівного контролю (EN ISO 9712:2012, IDT)
9. ГОСТ 1 42107-89 «Контроль неразрушающий. Методы активные тепловые. Способы теплового нагрева.»
10. ГОСТ 23484-79 «Контроль неразрушающий. Методы теплового вида. Общие требования»
11. Сусликов Л. М., Студеняк І. П. НЕРУЙНІВНІ МЕТОДИ КОНТРОЛЮ. Навчальний посібник для студентів фізико-технічних спеціальностей - Ужгород, 2016 – 192 с.

12. Білокур І.П., Коваленко В.А. Дефектоскопія матеріалів та виробів. - Київ: Техніка, 1989. - 192 с.
13. Білокур І.П. Дефектологія та неруйнівний контроль. – Київ: Вища шк., 1990. - 207с.
14. Федотов І.Н., Зварич В.І., Бойко А.П., Агамов Л.Г До питання застосування засобів неруйнівного контролю для перевірки технічного стану планера літака // Збірник наукових праць ДНДІА. – К.: ДНДІА, 2013. – Вип. 9 (16). – С. 199–203.
15. Бойко А.П., Хіжун В.В., Турчин В.М. Особливості навантаження лопатей несучого гвинта вертольота та динаміка утомленісних руйнувань. // Збірник наукових праць ДНДІА. – К.: ДНДІА, 2015. - Вип. №11(18) – С.148 https://www.dndia.org.ua/doc/znp/ZNP_DNDIA_2015.pdf
16. Пащенко С. В., Манулін Ю. О., Белінська Р. Б., Аналіз найбільш небезпечних дефектів несучого та рульового гвинтів вертольотів типу МІ-8 // Збірник наукових праць ДНДІА. – К.: ДНДІА, 2015. - Вип. №11(18) – С. 201 https://www.dndia.org.ua/doc/znp/ZNP_DNDIA_2015.pdf
17. Федотов І. Н., Зварич В. І., Ільїна О. В., Щодо деяких питань впровадження частотного методу неруйнівного контролю технічного стану конструкції крила літака // Збірник наукових праць ДНДІА. – К.: ДНДІА, 2015. - Вип. №11(18) – С.230 https://www.dndia.org.ua/doc/znp/ZNP_DNDIA_2015.pdf
18. Хільченко М.Ф., Манулін Ю.О., Фурдило С.А. Застосування метода контролю частоти власних коливань для визначення технічного стану крила літака // Збірник наукових праць ДНДІА. – К.: ДНДІА, 2013. – Вип. 9 (16). – С. 204– 212.
19. Теоретичні основи ультразвукового неруйнівного контролю [Електронний ресурс]: / Р. М. Галаган; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ:, 2019. – 263 с.

20. Контроль якості зварювання. Т. 1. Неруйнівні методи контролю: навчальний посібник / Г. І. Камель, Ю. А. Гасило, П. С. Івченко, Р. Я. Романюк. — Кам'янське : ДДТУ, 2018. — 241 с.