

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»
Факультет комп'ютерно-інформаційних технологій та автоматизації
(повне найменування інституту, назва факультету)

Кафедра електронної техніки
(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри електронної техніки

_____ Олександр ВОВНА
(підпис) (ім'я та прізвище)

«__» _____ 2022 р.

Випускна кваліфікаційна робота

_____ бакалавра
(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему «Розробка електронного пристрою вимірювання механічної напруженості різьбових з'єднань»

Виконав студент 4 курсу, групи ЕЛТЗ-18
(шифр групи)

спеціальності _____ 171 Електроніка
(шифр і назва спеціальності)

_____ Доценко Дмитро Володимирович
(Прізвище, Ім'я та По-батькові) (підпис)

Керівник _____ проф. кафедри ЕТ, д.т.н., проф. _____ Анатолій ЗОРІ
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ім'я) (підпис)

Рецензент _____ зав. каф. ПМІ, д.т.н., проф. _____ Ольга ДМИТРИЄВА
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ім'я) (підпис)

Нормоконтроль
зав. кафедри ЕТ, д.т.н., проф.

Засвідчую, що у цій випускній кваліфікаційній роботі немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

_____ Олександр ВОВНА
(підпис)

Студент _____
(підпис)

Луцьк – 2022 р.

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»
Факультет комп'ютерно-інформаційних технологій та автоматизації
(повне найменування інституту, назва факультету)

Кафедра електронної техніки
(повна назва кафедри)

Захист відбувся _____
(дата)

з оцінкою _____

Секретар ЕК _____
(підпис)

Випускна кваліфікаційна робота бакалавра

Тема: «Розробка електронного пристрою вимірювання механічної напруженості
різьбових з'єднань»

Спецчастина: _____

Виконавець, студент

гр. ЕЛТз – 18

Дмитро ДОЦЕНКО

(підпис, дата, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник

Анатолій ЗОРІ

(підпис, дата, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Консультанти:

Олександр ВОВНА

(підпис, дата, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Іван ЛАКТИОНОВ

(підпис, дата, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Олександр ШТЕПА

(підпис, дата, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

**Державний вищий навчальний заклад
"Донецький національний технічний університет"**

Інститут, факультет Комп'ютерно-інформаційних технологій та автоматизації
Кафедра Електронна техніка
Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр
Галузі знань 17 Електроніка та телекомунікації
(шифр і назва)
Спеціальність 171 Електроніка
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри електронної техніки

Олександр ВОВНА

« » 2022 року

З А В Д А Н Н Я
НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

Доценко Дмитро Володимирович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Розробка електронного пристрою вимірювання механічної напруженості різьбових з'єднань

керівник проекту (роботи) Зорі Анатолій Анатолійович, д.т.н., проф.

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від 29.04.2022 року № 163

2. Строк подання студентом проекту (роботи) _____

3. Вихідні дані до проекту (роботи)

Технічна документація та матеріали з переддипломної практики

4.Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) аналіз та характеристика об'єкту; обґрунтування та розробка структурної схеми електронного пристрою; розробка принципової схеми електронного пристрою; оцінка метрологічних характеристик; синтез мікропроцесорної частини електронного пристрою; розробка конструкції та зовнішнього вигляду електронного пристрою.

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

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	проф. каф. ЕТ, д.т.н., проф. Зорі А.А.		
3	зав. каф. ЕТ, д.т.н., проф. Вовна О.В.		
2.1	проф. каф. ЕТ, д.т.н., доц. Лактіонов І.С.		
2.2	доц. каф. ЕТ, к.т.н., доц. Штепа О.А.		

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Аналіз методів вимірювального контролю механічної напруженості різьбових з'єднань		
2	Обґрунтування та вибір засобів вимірювання механічної напруженості різьбових з'єднань		
3	Розробка електронного пристрою вимірювання швидкості розповсюдження ультразвукових хвиль		
4	Додаток А – Охорона праці та безпека під час надзвичайних ситуацій на підприємстві		

Студент

(підпис)

Дмитро ДОЦЕНКО

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Анатолій ЗОРІ

(прізвище та ініціали)

ЛИСТ ЗАУВАЖЕНЬ

Посада, Ім'я та ПРІЗВИЩЕ	Суть зауваження, оцінка та підпис

АНОТАЦІЯ

Доценко, Д.В. Розробка електронного пристрою вимірювання механічної напруженості різьбових з'єднань / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «бакалавр» зі спеціальності 171 Електроніка. – ДВНЗ «ДонНТУ», Луцьк, 2022.

Пояснювальна записка: 58 стор., 21 рис., 4 табл., 17 посилань.

Розробка електронних пристроїв акустичної тензометрії різьбових деталей базується на лазерно-ультразвуковому дефектоскопі, який має високу роздільну здатність випромінювання та низьку величину похибки результату вимірювання. Виконано моделювання розповсюдження ультразвукових коливань у шпильках, які мають різний типовий розмірів. Під час моделювання доказано можливість застосування розробленого засобу вимірювання для реєстрації ультразвукових сигналів у шпильках і болтах, діаметр яких становить менше 8 мм, а також з діаметром до 30 мм, якщо відношення довжини до їх діаметра складає більше ніж 7, якщо діаметр більше 30 мм, то відношення може бути більше 10, для розглянутої номенклатури шпильок та болтів. З аналізу результатів математичного моделювання встановлено, що відношення сигнал/шум отриманого сигналу, який реєструється під час опромінюванні деталі, що має відношення довжини до її діаметра більше ніж 7 для п'єзоелектричного генерування становить від 4 до 7,5 дБ, ці значення є меншими, ніж під час застосування лазерно-ультразвукової генерації.

Виконано математичне моделювання розповсюдження ультразвукових коливань під час зміни характеристик і параметрів вимірювального перетворювача, та вибрано оптимальні конструктивні рішення електронного пристрою вимірювання механічної напруженості різьбових з'єднань.

Ключові слова: вимірювання, напруженість, різьбове з'єднання, ультразвукове коливання, дефектоскоп, модель, відношення сигнал/шум.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ МЕХАНІЧНОЇ НАПРУЖЕНОСТІ РІЗЬБОВИХ З'ЄДНАНЬ.....	9
1.1 Аналіз параметрів і характеристик різьбових з'єднань.....	9
1.2 Метод вимірювання зусиль затягування різьбових з'єднань на базі контролю деформації.....	13
1.3 Метод вимірювання зусиль на базі контролю кута повертання гайки	15
1.4 Метод вимірювання зусиль на базі контролю крутного моменту.....	16
1.5 Висновки.....	21
2 ОБҐРУНТУВАННЯ ТА ВИБІР ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ МЕХАНІЧНОЇ НАПРУЖЕНОСТІ РІЗЬБОВИХ З'ЄДНАНЬ.....	22
2.1 Аналіз засобів вимірювання швидкості ультразвукових хвиль.....	22
2.2 Оптико-акустичне збудження ультразвукової хвилі.....	26
3 РОЗРОБКА ЕЛЕКТРОННОГО ПРИСТРОЮ ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ХВИЛЬ.....	39
ВИСНОВКИ.....	48
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	50
ДОДАТОК А – Охорона праці та безпека під час надзвичайних ситуаціях на підприємстві.....	52

ВСТУП

У механічних конструкціях знайшли широке застосування роз'ємні з'єднання. Використання цих з'єднань мають наступні переваги: невисока вартість, доволі розширена номенклатура, зручність розробки, стандартизація, зручність застосування, розбирання та складання, взаємна заміненість з'єднань, а також доволі високі показники надійності. Зазначені переваги обумовлюють широке розповсюдження серед інших типів з'єднань. Роз'ємні з'єднання складають 70% від загальної кількості застосованих з'єднань. Отже, необхідно використовувати відповідні методи та технічні засоби вимірювального контролю параметрів і характеристик роз'ємних з'єднань. Одним з головних завдань вимірювального контролю параметрів роз'ємних з'єднань є забезпечення оптимальної величини механічного розтягування напружень у шпильках і болтах. Зазвичай для розв'язання зазначеного завдання застосовують пристрої, які пов'язані з визначенням величини механічних напружень, що є динамометричними ключами. Проте, в інших випадках, а саме під час виготовлення дорогих і відповідальних елементів виробів, під час кріплення блоків і вузлів ракетної техніки, необхідно виконувати вимірювальний контроль величини механічної напруженості, що має місце у різьбовій виробі, що обумовлено деякими труднощами [1].

Отже, з обліком призначення, а також типу конструкції, зміни параметрів і характеристик навколишніх умов експлуатації: температури, тиску в широких межах і впливу хімічних реагентів, умов експлуатації під час вібрації та підвищеного навантаження, особливих вимог щодо надійності та економічних показників, обов'язковим є здійснення вимірювального контролю механічної напруженості різьбових з'єднань, що застосовуються у спеціальних конструкціях. Спеціальні різьбові з'єднаннями – це з'єднання, які мають спеціальне призначення та використовуються в окремих галузях промислового та спеціального виробництва.

У теперішній час неруйнівний вимірювальний контроль механічних напружень різьбових з'єднань здійснюється різними методами:

- вимірюванні величини кута повертання гайки;
- контролю крутного моменту;
- вимірювання показників деформації;
- вимірювання комбінованих показників;
- застосування ультразвукових хвиль для визначення необхідних характеристик і параметрів.

Переважну більшість зазначених методів неможливо застосовувати з погляду на такі фактори:

- різьбове з'єднання вже розроблено та створене, тому немає змоги вносити до його конструктиву зміни;
- доступ до з'єднання має місце тільки з головки болта;
- має місце низьке значення точності для визначення напруження, відносне значення похибки під час цього становить від +25 до -35%;
- величина крутного момент, що задається інструментом, витрачається на сили тертя, які мають місце між головкою болта або гайкою, а також сили тертя в різьбовому з'єднанні.

Отже, необхідно розробити електронний пристрій вимірювального контролю механічного напруження різьбових з'єднань, який базується на методів акустичної тензометрії. До переваг зазначеного методу можна віднести те, що розташування п'єзоелектричного перетворювача можна здійснювати на торцях деталей, що відрізняє його від інших методів.

1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ МЕХАНІЧНОЇ НАПРУЖЕНОСТІ РІЗЬБОВИХ З'ЄДНАНЬ

У теперішній час неруйнівний вимірювальний контроль зусиль для зтягування різьбових з'єднань здійснюється методами, які базуються на:

- визначенні значення кута повертання гайки;
- вимірюванні величини крутного моменту;
- вимірювальному контролі параметрів і характеристик деформації;
- комбіноване визначення параметрів;
- застосування ультразвукових хвиль;
- використання резонансних явищ.

1.1 Аналіз параметрів і характеристик різьбових з'єднань

Через відсутність точних інформаційних даних щодо стискаючих зусиль, які мають місце під час різьбових з'єднань деталей, є однією з головних причин їх руйнації, що виникає через відсутність достовірних способів і технічних засобів вимірювального контролю значень зусиль. Для проведення вимірювань доступний лише торець деталі, який під час навантаженні у робочих межах вважається недеформованим. Отже, для вимірювання показників деформації такі методи як електрична та рентгенівська тензометрія, методи фотопружних і магнітопружних покриттів доволі складно використовувати для визначення показників зусиль, які мають місце під час різьбових з'єднань. Під час застосування сучасних методів у простих випадках можна визначати значення напруженості, проте без використання експериментів неможливо ідентифікувати стан деталей.

Якість різьбових з'єднань забезпечується завдяки рівномірному розподілу зусиль, що стискає, та точності підгонки деталей.

Низьке значення точності та недостатній ступінь рівномірності зусиль, що стискає, під час виготовлення та утворення різьбовими з'єднаннями, призводять до виникнення під час експлуатації значних вібрації, сильного зношення та відмов, що обумовлено деформацією різьби, руйнувань цих з'єднань, самостійне відгвинчування болтів і гайок, деформування елементів, що скріплюються. Під час експериментальних досліджень встановлено, що до 70 % пошкоджень різьбових з'єднань обумовлено неточним затяганням [2, 3].

Різьбове з'єднання є доволі простим елементом, проте це з'єднання може бути причиною виходу з ладу пристроїв, а також виникненню додаткових витрат ресурсів під час ремонтних, монтажних і демонтажних робіт. Отже, під час здійснення робіт з конструювання цих з'єднань необхідно застосовувати точний та методичний підхід, що має змогу виключити помилки.

Під час експериментальних досліджень встановлено, що відмови різьбових з'єднань обумовлено наступними причинами [4]:

- недостатнє зусилля, що розтягує, або перевищене його величини;
- виконано неправильне підбирання компонентів різьбового з'єднання;
- нерівномірне розподілення зусиль, що розтягує.

Так, у двигунах літаків застосовується кілька тисяч різьбових деталей, які визначають надійність його роботи в цілому. Тому одними з важливих технологічних заходів під час складання вузлів авіаційних двигунів є здійснення необхідного затягування зазначених різьбових з'єднань.

Отже, одним з важливих питань щодо правильного підбору компонентів різьбових з'єднань, є визначення величини зусилля під час попереднього затягування, а також вимірювального контролю цього значення, що повинно здійснюватися з регламентованими показниками точності.

Крутний момент ($M_{кр}$, H_m) визначається як момент сили, яку прикладається до гайки з відстанню від центру. Значення крутного моменту визначається як добуток величини сили на плече, під час дії якого має місце поворот гайки навколо своєї осі.

Болт, який застосовується в різьбовому з'єднанні, знаходиться постійно під механічною напруженістю, він повинен бути стійким до втоми. Проте, якщо значення початкового зусилля є малою, то під час дії навантажень, яке може змінюватися, болт доволі швидко пошкоджується. Якщо величина початкового зусилля є доволі великою, то під час затягування може мати місце його руйнування. Отже, одним з важливих та базових факторів під час затягування різьбового з'єднання є зусилля, що діє поперек затяжки. Під час цього момент, що крутить, який створюється інструментом, побічно визначає значення діючого зусилля, що є поперек затягуванню.

Величина зусилля попереднього затяжки вимірюється в ньютонах та визначається в діапазоні від 75 до 90% від навантаження, що визначено під час попередніх випробувань. Це значення від 5 до 10% є меншим, ніж величина добутку площі перетину деталі на значення плинності [5].

Величина пробного навантаження, яке використовується для затягування деталей, що має клас міцності не менше 6,8, знаходиться в межах від 74 до 79 % від мінімальної величини руйнівного навантаження.

Мінімальне значення руйнівного навантаження визначається, як добуток межі міцності до опору розривання стрижневої деталі кріплення до номінальної величини площі перетину.

Отже, зусилля, що створюється під час затягування [6], не повинно давати змогу до переходу різьбового кріплення від меж пружності до пластичного деформування матеріалу деталі.

Для отримання надійного різьбового з'єднання, яке повинно забезпечити необхідну несучу здатність, герметичність, міцність на зсування та розтягування, працювати під час дії змінних навантажень, необхідно розраховувати за стискаючим зусиллям, а також за механічною напруженістю в різьбових з'єднаннях. Зазначені параметри мають вагоме значення, а на базі них визначаються інші параметри, які характеризують подовження деталі, крутний момент та ін. Якщо попереднє затягування виконано доволі точно, то має місце якісне з'єднання, проте, з підвищенням точності збільшується собівартість

процесу попереднього затягування.

Недостатня величина попереднього затягування призводить до [4]:

- збільшення амплітуди напруження болта;
- зсуву поверхні з'єднання під час дії навантаження за віссю;
- інтенсифікація процесу старіння гвинта;
- ковзання з'єднання під час дії моменту зсуву;
- відгвинчування гайки під час дії вібрації.

Занадто сильна величина попереднє затягування призводить до [4]:

- відгвинчування болта під час дії зовнішнього навантаження, що розтягує, зі впливом пластичного подовження;
- збільшення величини статичного навантаження болта;
- виникнення розривів болта під час його попереднього затягування.

Існує два найбільш вагомих фактори, зміна яких зменшує міцність різьбових з'єднань:

- послаблення зусилля під час затягування;
- самостійне відгвинчування.

Після закінчення фіксації в болтовому з'єднанні має місце навантаження стиснення тому, що болт затягується. Це подібно пружині та гайці, яка зсувається до голівки болта, та починається процес утворення між частинами з'єднання стискаючої сили. Після того, як напруження стиснення зменшується до нуля, виникають такі умови, які відкручують гайку. Різьбленні та тертя головкою болта та гайкою ускладнює процес затягування [6].

Під час впливу на різьбове з'єднання вібрацій або змінних навантажень, зменшується вплив блокування, що обумовлено тертям. Це дозволяє гайці вільно ковзати по різьбою, що зменшує силу зчеплення. Вібрації можуть мати місце як в подовжньому, так і в поперечному напрямках, а також вони можуть бути комбінованими, які мають місце в обох напрямках. Найбільшу небезпеку мають поперечні вібрації, а також навантаження, які мають різний знак у горизонтальній площині. Наявність цих факторів доволі швидко може призвести до ослаблення різьбових з'єднань. Якщо має місце чергування

осьових навантажень і поздовжніх вібрацій, то зменшується ослаблення різьбових з'єднань.

Якщо має місце змін величини осьових навантажень на болт та температурні впливу, то збільшується довжина болта, а також зменшуються зусилля щодо затягування. Причиною цього зменшення є деформація матеріалу, з якого виготовлено прокладу. Причинами зміни довжини може бути: під час проковзуванні, це відбувається коли величина тиску, що дії на опорну поверхню болтів і гайок буде вище ніж опір стиснення матеріалів поверхонь деталей, що з'єднуються між собою; просіданні має місце, коли контактні поверхні гайки або шайби під впливом тиску натягу болта деформуються [6].

Отже, застосування тензометрії різьбових з'єднань є актуальним завданням, яке необхідно здійснювати під час експлуатації, ремонті та виготовленні виробів енергетичної, машинобудівної, будівельної, спеціальної та інших галузей промисловості.

1.2 Метод вимірювання зусиль затягування різьбових з'єднань на базі контролю деформації

Вимірювальний контроль величини зусилля під час затягування різьбових з'єднань, базується на визначенні величини деформації та полягає у вимірюванні зміни довжини деталі Δl та подальшим розрахунком величини зусилля затягування:

$$Q_3 = \frac{\Delta l}{\lambda_0},$$

де λ_0 – коефіцієнт, що характеризує податливість матеріалу.

Вимірювання зміни довжини різьбової деталі можна здійснювати прямим методом, якщо є доступ, а також зі застосуванням тензорезистивних перетворювачів або інших сенсорів.

Для здійснення вимірювального контролю зміни зусиль під час затягування використовуються шайби, які мають спеціальну конструкцію, що наведено на рис. 1.1, а також тензочутливі покриття, які мають змогу змінювати колір під час дії деформації. У літературних джерелах описано способи оцінки деформаційних змін торцевих поверхонь шпильок і болтів зі застосуванням оптичної голографії [7]. Проте, на торцевих поверхнях різьбових деталей зазвичай не відображають зусилля, що розтягують.

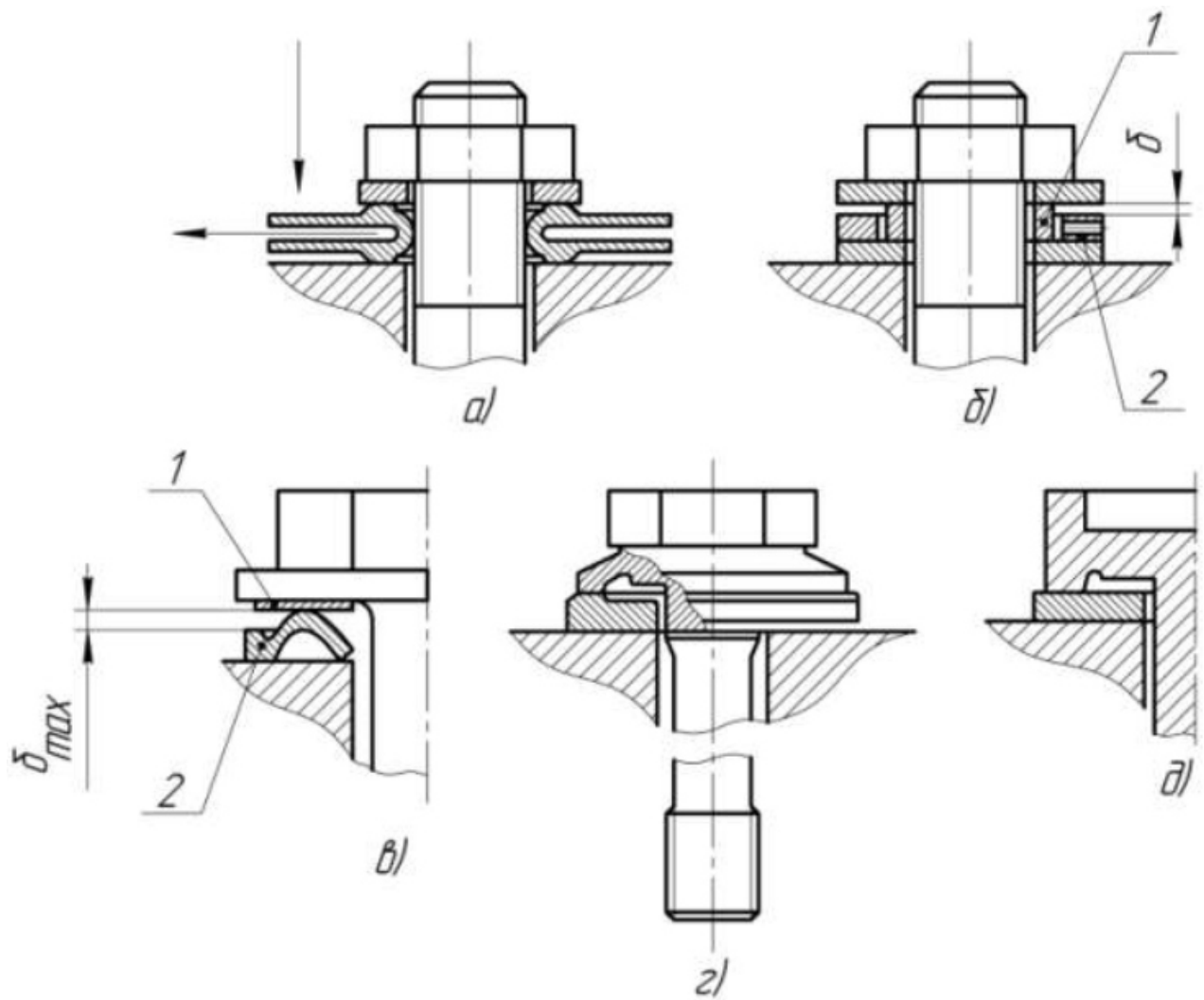


Рисунок 1.1 – Шайби для вимірювального контролю величини сили затягування роз'ємних з'єднань

У деяких випадках величину деформація спеціальної шайби можна визначити зі застосуванням пневмотензометричного методу вимірювального контролю. Цей метод базується на вимірюванні змін витрати повітря (див. рис. 1.1, а). Спеціальну шайбу та кільце (див. рис. 1.1, б) вибираються таким чином, щоб під час регламентованого навантаження шайба деформувалась пластично до фіксації з кільцем 2.

Результати експериментальних лабораторних досліджень, а також досліджень, що виконано в промислових умовах показали, що відносне значення похибки вимірювання сили затягування цим способом складає не більше $\pm 10\%$. Отримані результати свідчать про те, що величину напруженості затягування болта можна вибирати більше $0,7 \cdot \sigma_T$. Якщо застосувати способи, що мають гірші показники точності вимірювального контролю зусиль, що утворюються, то необхідно зменшити напруженість затягування до $(0,4 \dots 0,5) \cdot \sigma_T$.

Також зазвичай може застосовуватися фасонна шайба, що наведено на рис. 1.1, в. Під час затягування такого типу шайби має місце стикання з різьбовою деталлю спочатку її поверхню 1, а потім цих поверхонь між собою. Момент затягування поступово збільшується. Такий самий принцип покладено в основу конструкцію шайби, що наведено на рис. 1.1, г та рис. 1.1, д, застосування якого може забезпечити більш точне затягування. Застосування шайб може бути обмежено регламентованими вимогам щодо ваги, а також матеріалам і динамічними властивостями з'єднання, що збільшує вартість та трудомісткість виготовлення готового виробу.

1.3 Метод вимірювання зусиль на базі контролю кута повертання гайки

Цей метод базується на затягуванні гайки після забезпечення контакту торцевої поверхні виробу на величину кута φ . Цей кут відповідає регламентованій пружності розтягування різьбової деталі під час дії необхідного зусилля, що розтягує.

Величину кут повороту можна визначити за таким співвідношенням:

$$Q_3 = \frac{\varphi}{360^\circ} \cdot \frac{h}{\lambda_0 + \lambda_1},$$

де h – крок різьблення шпильки або болта;

λ_0 та λ_1 – коефіцієнти податливості деталей, які скріплюються, а також шпильки або болта.

Вимірювання величини кута повертання здійснюється з величиною абсолютної похибки від 10 до 15° зі застосуванням шаблонів, прокладок та ін. [8]. Довідникові значення коефіцієнтів податливості наведено без обліку стану різьбової деталі, а також її кручення.

1.4 Метод вимірювання зусиль на базі контролю крутного моменту

Найбільшого розповсюдження серед відомих методів вимірювання зусиль отримав метод на базі контролю величини крутного моменту. Однією з головних його переваг є те, що затягування зі застосуванням цього методу займає мінімальний проміжок час, а інструмент не дорого коштує. До недоліку зазначеного методу можна віднести низьку точність визначення розрахункової величини зусилля, відносне значення похибки знаходиться в межах від 25 до 35% [7]. Вимірювальний контроль прикладеного крутного моменту здійснюється зі застосуванням граничного або динамометричного спеціалізованого інструменту. Затягування здійснюється до обертального моменту, величина якого регламентується технічними умовами.

Регламентоване значення в технічних умовах крутного моменту, що прикладається до болта або гайки (момент затягування $T_{кл}$), забезпечує потрібне значення зусилля, що розтягує, воно витрачається на подолання сил тертя (див. рис. 1.2):

$$T_{\text{кл}} = T_{\text{т}} + T_{\text{р}},$$

де $T_{\text{р}}$ – момент сил тертя на витках різьблення, $\text{Н}\cdot\text{м}$;

$T_{\text{т}}$ – момент тертя між деталлю та гайкою, $\text{Н}\cdot\text{м}$.

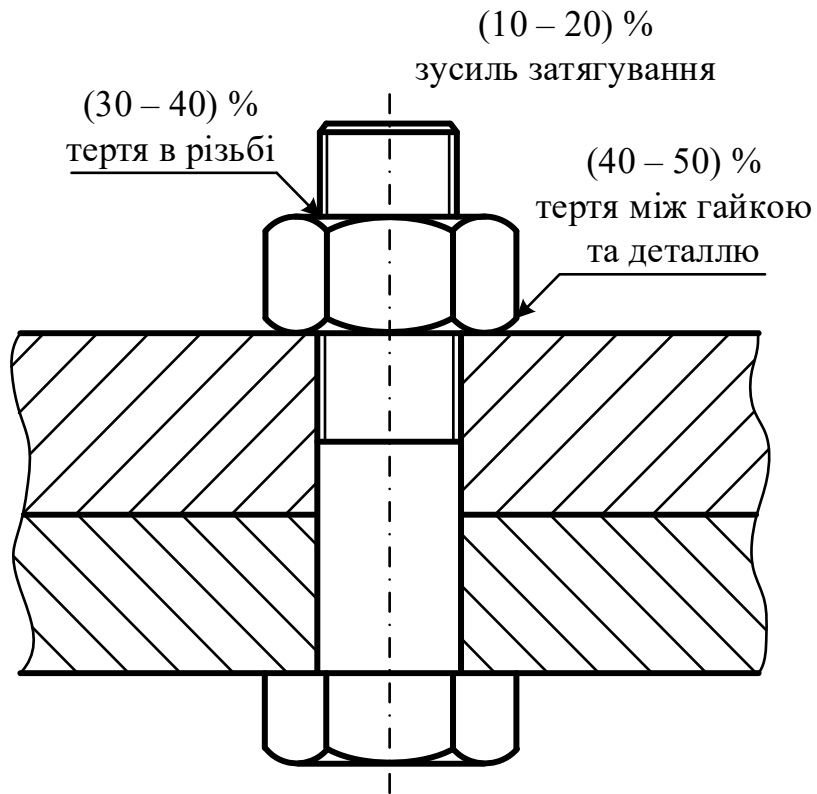


Рисунок 1.2 – Витрата крутного моменту на подолання сили тертя

Величину моменту сили тертя між деталлю та гайкою можна як:

$$T_{\text{т}} = f_{\text{т}} \cdot F_0 \cdot R_{\text{т}},$$

де F_0 – зусилля, що розтягує, Н ;

$f_{\text{т}}$ – коефіцієнт тертя між деталлю та гайкою;

$R_{\text{т}}$ – наведений радіус тертя, мм :

$$R_{\text{т}} = \frac{D_1}{2},$$

де D_1 – діаметр опорної поверхні гайки, мм.

Значення моменту сил тертя на витках різьблення можна визначити за формулою (див. рис 1.3):

$$T_p = 0,5 \cdot R_A \cdot d_2 = 0,5 \cdot d_2 \cdot F_0 \cdot \tan(\beta + \rho),$$

де R_A – зусилля за колом, Н;

ρ – кут тертя, град:

$$\rho = \arctan(f_p),$$

де f_p – наведене значення коефіцієнту тертя в різьблення:

$$f_p = \frac{f}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)},$$

де d_2 – значення середнього діаметру різьблення, мм;

f – коефіцієнт тертя фрикційної пари;

α – кут профілю різьблення, град;

β – кут піднімання різьблення, град.

$$\tan(\beta + \rho) = \frac{\tan(\beta) + \tan(\rho)}{1 - \tan(\beta) \cdot \tan(\rho)}.$$

Після підстановки та скорочень отримано:

$$T_p = F \cdot \frac{d_2}{2} \cdot \frac{\tan(\beta) + \tan(\rho)}{1 - \tan(\beta) \cdot \tan(\rho)} = F \cdot \frac{d_2}{2} \cdot \frac{\frac{P}{\pi \cdot d_2} + f_p}{1 - \frac{P}{\pi \cdot d_2} \cdot f_p}.$$

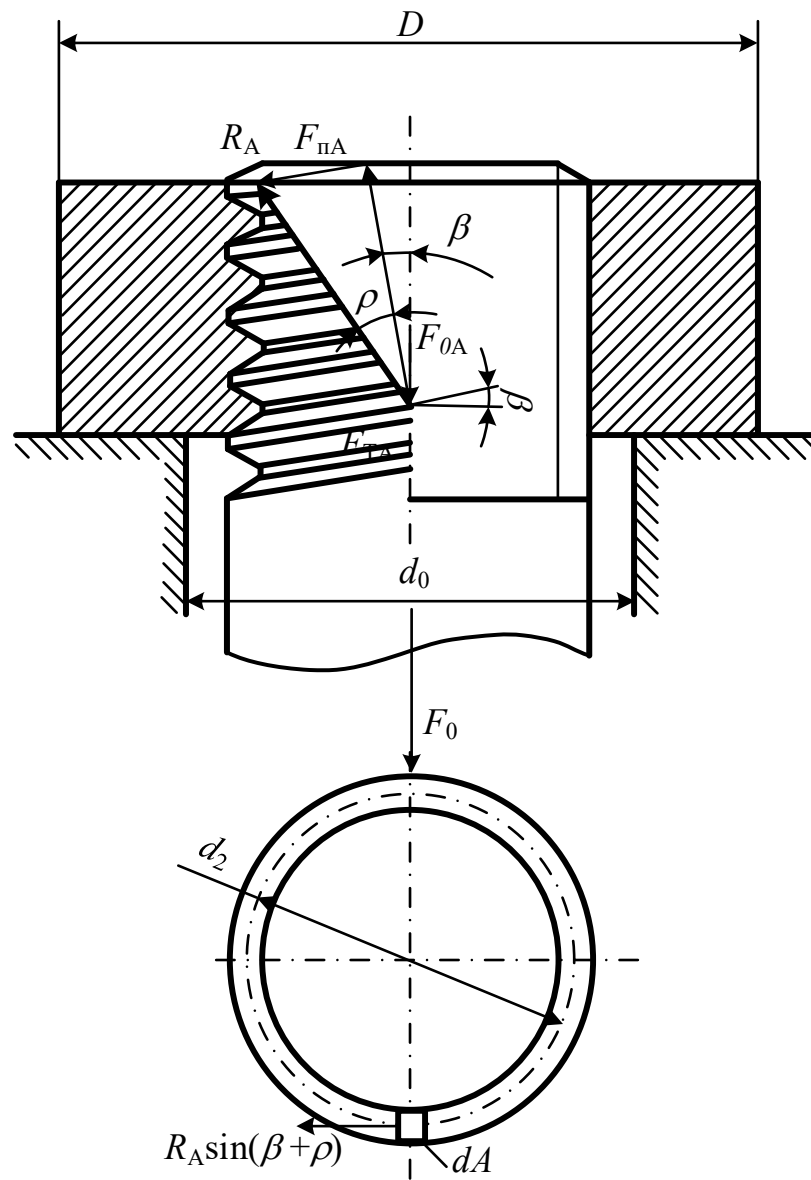


Рисунок 1.3 – Розподіл сили, що має місце в різьбовій парі

Так як

$$\frac{P}{\pi \cdot d_2} \cdot f_p \ll 1,$$

то

$$T_p = F \cdot \frac{d_2}{2} \cdot \left(\frac{P}{\pi \cdot d_2} + f_p \right).$$

Залежність зміни моменту загвинчування від необхідного значення зусилля можна розрахувати за такою формулою:

$$T_{\text{кл}} = T_{\text{загв}} = F_0 \cdot \frac{d_2}{2} \cdot \left(f_{\tau} \cdot \frac{P}{\pi \cdot d_2} + f_p \right) + F_0 \cdot \frac{P}{2 \cdot \pi}.$$

Залежність зміни моменту відгвинчування від необхідного значення зусилля можна як [5]:

$$T_{\text{відгв}} = T_{\text{загв}} - \frac{F_0 \cdot P}{2} = F_0 \cdot \frac{d_2}{2} \cdot \left(f_{\tau} \cdot \frac{P}{\pi \cdot d_2} + f_p \right) - F_0 \cdot \frac{P}{2 \cdot \pi}.$$

Під час експлуатації, а також збиранні, розбиранні й зберіганні стан різьбових з'єднань може погіршуватися завдяки зношенню, окисленню, покриванні маслами тощо. Тому значення коефіцієнтів тертя може змінюватися в широких межах від 0,05 до 0,5), це призводить до відхилення величини зусиль від регламентованих значень.

Механічне зношення та окислення може привести до зміни якості поверхні, яка контактує. Підвищення значення коефіцієнтів тертя не дозволяє виконувати вимірювальний контроль зусилля з потрібною точністю. Пошкодження різблення може привести до збільшення величини моменту опору під час загвинчування.

Під час дії вібрацій та навантажень, що мають різні знаки, має місце мікротертя поверхонь різблення. Це призводить до виникнення корозії [10] та збільшення величини моментів опору, та як наслідок прискорення зношення деталей.

Отже, під час затягування з високими втратами на тертя різьбової деталі витрачається більше 10% від загальної величини моменту (див. рис. 1.1).

Величина похибка вимірювання моменту, який обомовлено дією інструменту, залежить від вибраного методу вимірювального контролю.

1.5 Висновки

З обліком таких факторів, як тип конструкції та її призначення, особливі вимоги під час експлуатації до надійності, підвищений рівень вібрацій та навантаження, зміни температури та тиску в широких межах, а також наявності хімічно активних реагентів, відносна висока вартість виробів, до складу яких входять різьбові з'єднання визначено, що обов'язковим є здійснення вимірювального контролю зусиль на затягування різьбових з'єднань. Для переважної більшості виробів важливим є отримання вимірювальної інформації щодо зусилля затягування, а також рівномірність цього затягування. Концентрування навантаження на одній деталі зазвичай призводить до її руйнації, а також послідовної руйнації з'єднання в цілому [9].

До основної переваги акустичних методів вимірювального контролю можна віднести оцінку стану загального обсягу деталі, якщо є можливість одностороннього доступу до цієї деталі. У інших методів неруйнівного вимірювального контролю ця можливість відсутня.

2 ОБҐРУНТУВАННЯ ТА ВИБІР ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ МЕХАНІЧНОЇ НАПРУЖЕНОСТІ РІЗЬБОВИХ З'ЄДНАНЬ

2.1 Аналіз засобів вимірювання швидкості ультразвукових хвиль

Тензометричний метод вимірювального контролю параметрів різьбових з'єднань базується на визначенні швидкості розповсюдження ультразвукової хвилі болтах та шпильках. Отже, для здійснення подальших розробок та досліджень потрібно підібрати засіб для вимірювання швидкості розповсюдження ультразвукової хвилі, який:

- забезпечує введення ультразвукового сигналу та вимірювання параметрів цього сигналу в болтах та шпильках, які мають діаметр менш ніж 8 мм;

- забезпечує введення ультразвукового сигналу та вимірювання його параметрів в болтах та шпильках, які мають діаметр не більше 30 мм під час дії співвідношенні довжини та діаметра більше ніж 7, якщо величина діаметру складає більше ніж 30 мм, то це відношення повинно бути більше 10;

- вимірювати швидкість розповсюдження ультразвукових хвиль з високими показниками точності вимірювання.

Для здійснення аналізу показників точності засобів вимірювання швидкості розповсюдження ультразвукових хвиль розглянуто державну повірочну схему для робочих засобів вимірювання.

Первинний національний стандарт має в своєму складі сукупність засобів вимірювання:

- дві установки для здійснення вимірювання швидкості розповсюдження різних типів ультразвукових хвиль на базі безконтактних оптичних засобів збудження та приймання;

- три набори заходів для розповсюдження поперечних, поздовжніх і поперечних ультразвукових хвиль;

– комплекс засобів для здійснення вимірювання температури.

Наведено державні первинні зразки можуть відтворювати швидкості розповсюдження поздовжніх ультразвукових хвиль у межах від $5 \cdot 10^3$ до $6,5 \cdot 10^3$ м/с, а також поперечних ультразвукових хвиль у межах від $2 \cdot 10^3$ до $4 \cdot 10^3$ м/с.

Зазначені величини відтворюються з середньоквадратичною похибкою результатів вимірювань, значення якої складає не більше $4,6 \cdot 10^{-7}/d$ (для кількості від 11 до 18 вимірювань; d – товщина зразків вимірювання для поздовжніх ультразвукових хвиль); значення невиключеної систематичної похибки результатів вимірювання складає не більше $1,4 \cdot 10^{-4}$, якщо $P = 0,99$. Для поперечних ультразвукових хвиль більше ніж $5 \cdot 10^{-4}$, та більше $2,0 \cdot 10^{-3}$, відповідно.

Робочими вимірювальними засобами є спеціалізовані вимірювачі швидкості розповсюдження ультразвукових хвиль, ультразвукові товщиноміри, ультразвукові дефектоскопи, ультразвукові структуроскопи та інша вимірювальна апаратура. Діапазон допустимої відносної похибки вимірювання засобами складає для поздовжніх ультразвукових хвиль від $3 \cdot 10^{-4}$ до $3 \cdot 10^{-2}$ та для поперечних ультразвукових хвиль від $5 \cdot 10^{-3}$ до $5 \cdot 10^{-2}$.

Відносно значення зміни швидкості розповсюдження ультразвукових хвиль під час виникнення напруження знаходиться до 10^{-2} , тому для забезпечення високої точності результатів вимірювання [10, 11] необхідно для акустичної тензометрії застосовувати поздовжні ультразвукові хвилі. Для збільшення достовірності результатів вимірювання необхідно використовувати сучасні технічні рішення. Під час аналізу акустичної тензометрії різьбових з'єднань виявлено, що параметри розповсюдження ультразвукових хвиль необхідно визначати зі застосуванням імпульсним методом. Засоби вимірювання повинні дозволяти здійснювати вимірювання проміжку часу розповсюдження ультразвукових хвиль у межах до 500 мкс, величина абсолютної похибки вимірювання під час цього складає не більш 0,1 мкс.

Під час застосування лазерного-ультразвукового методу можна забезпечити високі показники точності вимірювання швидкості розповсюдження ультразвукових хвиль. Це метод базується на генерації зі застосуванням термооптичного способу ультразвукових хвиль. Зазначений метод відтворює Державний первинний зразок розповсюдження швидкості ультразвукових хвиль

У теперішній час виготовляються достатньо велику кількість ультразвукових дефектоскопічних пристроїв. Високі метрологічні характеристики для вимірювання проміжку часу розповсюдження ультразвукових хвиль вимірювальними засобами досягаються завдяки застосуванню сенсорів з п'єзогенерацією ультразвукових хвиль, а також апаратури для вимірювального контролю, що забезпечує необхідні метрологічні характеристики. Апаратна компонента вимірювальних засобів відрізняється несуттєво. Виконаємо аналіз технічних характеристик і параметрів ультразвукових дефектоскопів, які використовують пьезо-датчики типу УД4-Т а також лазерно-ультразвукових дефектоскопів типу УДЛ-2М. Технічні характеристики та параметри зазначених електронних пристроїв наведено в табл. 2.1 та 2.2

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики та параметри дефектоскопа типу УД4-Т

Найменування характеристики	Значення
Діапазон глибини вимірювання	від 0,5 до 5000 мм
Абсолютне значення похибки вимірювання глибини	менш 0,1 мм
Межі допустимої основної похибки вимірювання часових інтервалів	менш 2 %
Діапазон частот ультразвукових хвиль	від 0,2 до 10 МГц
Динамічний діапазон	140 дБ
Розгортка	від 8 до 1600 мкс

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики та параметри дефектоскопа типу УДЛ-2М

Найменування характеристики	Значення
Діапазон вимірювальних значень швидкості розповсюдження ультразвукових хвиль, м/с	від $0,1 \cdot 10^3$ до $99 \cdot 10^3$ м/с
Діапазон частот ультразвукових хвиль	від 0,1 до 15 МГц
Межі допустимого відносного середньоквадратичного значення випадкової складової похибки вимірювання	$\pm 0,05 \%$
Межі допустимого значення основної похибки вимірювання швидкості розповсюдження ультразвукових хвиль	$\pm 1 \%$
Частота імпульсної послідовності	не менш 0,5 кГц
Діаметр ультразвукового потоку	від 0,5 до 4 мм
Робочий діапазон температур	від + 15 до + 35 °С
Робочий діапазон зміни відносної вологості повітря	від 50 до 80 %

Сучасний технічний стан засобів вимірювання зі збудження ультразвукових хвиль на базі п'єзоелектричних сенсорів не дозволяє виконувати вимірювальний контроль зусиль затягування для різьбових з'єднань, які мають малий діаметр, або малу величину відношення довжини до величини діаметра з потрібною точністю результату вимірювання через такі фактори [12]:

- розходження променю ультразвукових коливань, доволі великої кількості віддзеркалень від різьблення, перетворення ультразвукових хвиль, збільшення рівня шумів та зменшення чутливості та достовірності вимірювального контролю;

- діапазон зміни тривалості імпульсів знаходиться в межах від 100 до 500 нс;

- наявність зони нечутливості в межах від 0,8 до 1,0 мм істотно

ускладнює виконання вимірювань з визначенням інформативних параметрів сигналу від розділення середовищ виріб-сенсор, що не дозволяє здійснювати вимірювальний контроль під час реєстрації одного сигналу;

– можливість здійснювати вимірювальний контроль зусиль затягування різьбових з'єднань з болтами та шпильками, діаметр яких складає 12 мм, а також відношення довжини до діаметра становить 7.

Отже, для в основу розробки вимірювального пристрою покладено лазерно-ультразвуковий дефектоскоп типу УДЛ-2М, у складі якого необхідно застосувати спеціалізовані датчики.

2.2 Оптико-акустичне збудження ультразвукової хвилі

Під час імпульсного лазерного впливу поверхню об'єкта дослідження має місце збудження ультразвукових хвиль. Виникнення ультразвукових хвиль відбувається внаслідок перехідних процесів, час яких дорівнює тривалості впливу імпульсу лазерного випромінювання. Зі застосуванням термооптичної генерації має місце збудження коливань у смузі частот, величина якої становить до сотень мегагерц. Застосування зазначеного способу збудження ультразвукових хвиль стало можливим після розробки та створення високошвидкісних аналого-цифрових перетворювачів, які можуть здійснювати перетворення імпульсів з мінімальною тривалістю. Форма оптико-акустично імпульсів залежить від величини коефіцієнта поглинання оптичного випромінювання матеріалу, що досліджується, а також швидкості ультразвукових коливань і тривалості та діаметру оптичного випромінювання. Принцип виникнення та властиві оптико-акустичного ефекту наведено на рис. 2.1 [13]. Величина потужності ультразвукових імпульсів є пропорційною потужності оптичного випромінювання від лазера

$$\alpha \cdot W_0,$$

де α – коефіцієнт поглинання;

$$W_0 = \pi a^2 \cdot I_0,$$

де a – радіус оптичного випромінювання від лазера;

I_0 – інтенсивність на межі розділу матеріалу, що поглинає оптичне випромінювання.

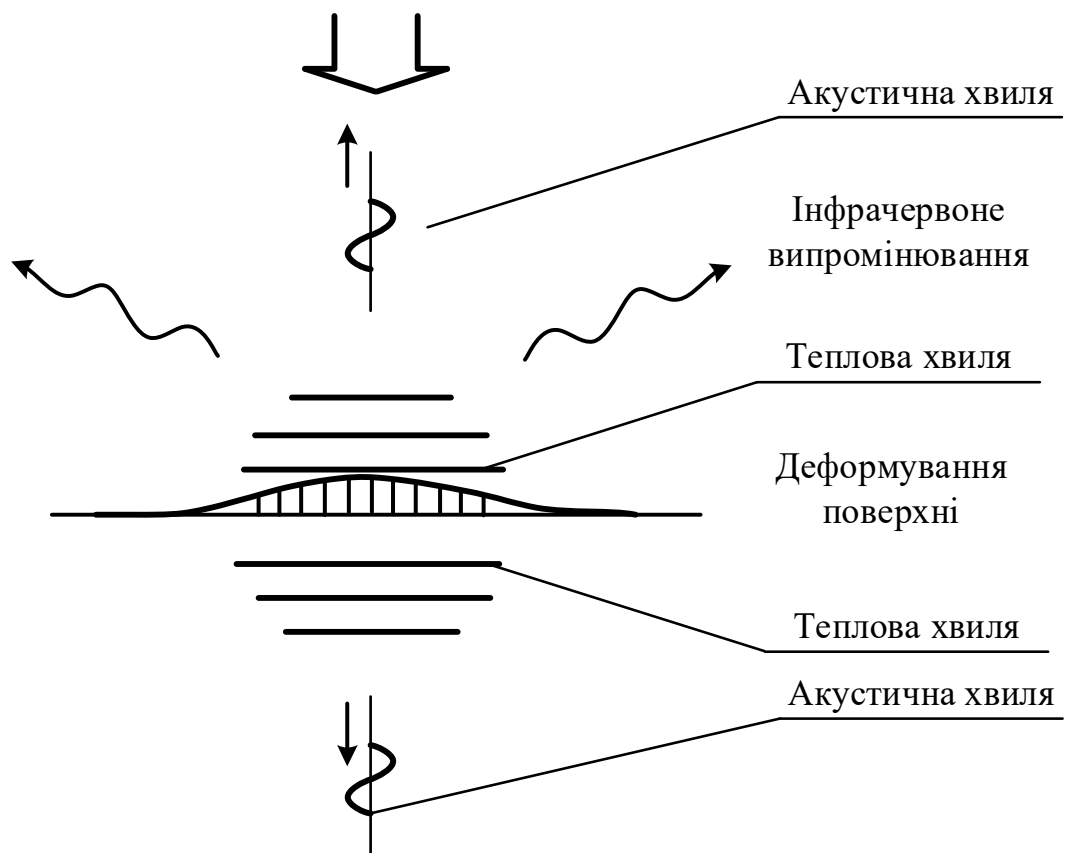


Рисунок 2.1 – Принцип виникнення та властиві оптико-акустичного ефекту

Якщо $\alpha \gg 1$, то генерація ультразвукових коливань є більш інтенсивною, тому, якщо досліджується середовище, що має невелике поглинання, то додатково застосовується генератор. Більшої величини енергії генерованих ультразвукових коливань можна отримати, якщо застосувати лазери в імпульсному режимі або під час модуляції добротності.

Під час застосування оптико-акустичного збудження (див. рис. 2.2) для середовища $\rho_0 c_0$ оптичний промінь проходить через прозоре середовище під прямим кутом $\alpha \gg 1$. Значення температури середовища вздовж z визначається за співвідношенням:

$$T' = \frac{\alpha \cdot \varepsilon_0}{\rho_0 \cdot c_p} \cdot e^{-\alpha z},$$

де $\varepsilon_0 = A \cdot \varepsilon_s$ – щільність енергії, що поглинається;

ε_s – поверхнева щільність енергії, що падає;

A – коефіцієнт поглинання випромінювання в матеріалі;

c_p – теплоємність матеріалу під час дії постійного тиску;

ρ_0 – щільність матеріалу;

$\alpha \cdot \varepsilon_0 \cdot e^{-\alpha z}$ – щільність теплоти, що розсіюється в матеріалі.

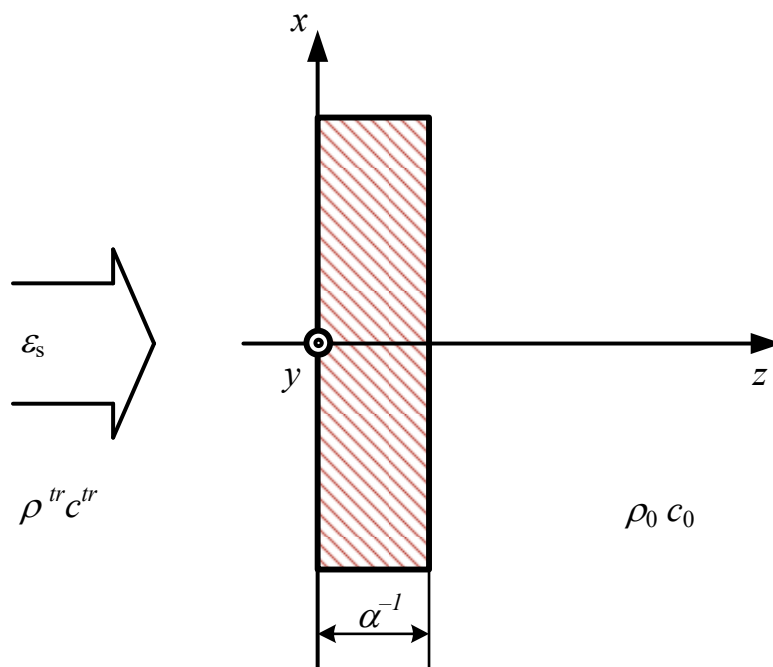


Рисунок 2.2 – Виділення тепла під час поглинання оптичного випромінювання від лазера

Час пробігу ультразвукових хвиль $(\alpha \cdot c_0)^{-1}$ є значно більше ніж тривалість оптичного імпульсу τ_l :

$$\alpha \cdot c_0 \cdot \tau_l \ll 1.$$

Процес нагрівання матеріалу здійснюється практично миттєво. Поле деформацій утворюється завдяки виникненню неоднорідності сформованого поля температур. Величина тиск у матеріалі, якщо $z > 0$, визначається за аналітичним співвідношенням [14]:

$$p' = \rho_0 \cdot c_0^2 \cdot \beta \cdot T' = \frac{\alpha \cdot c_0^2 \cdot \beta \cdot \varepsilon_0}{c_p} \cdot e^{-\alpha \cdot z} = p_a \cdot e^{-\alpha \cdot z},$$

де p_a – нормальний тиску;

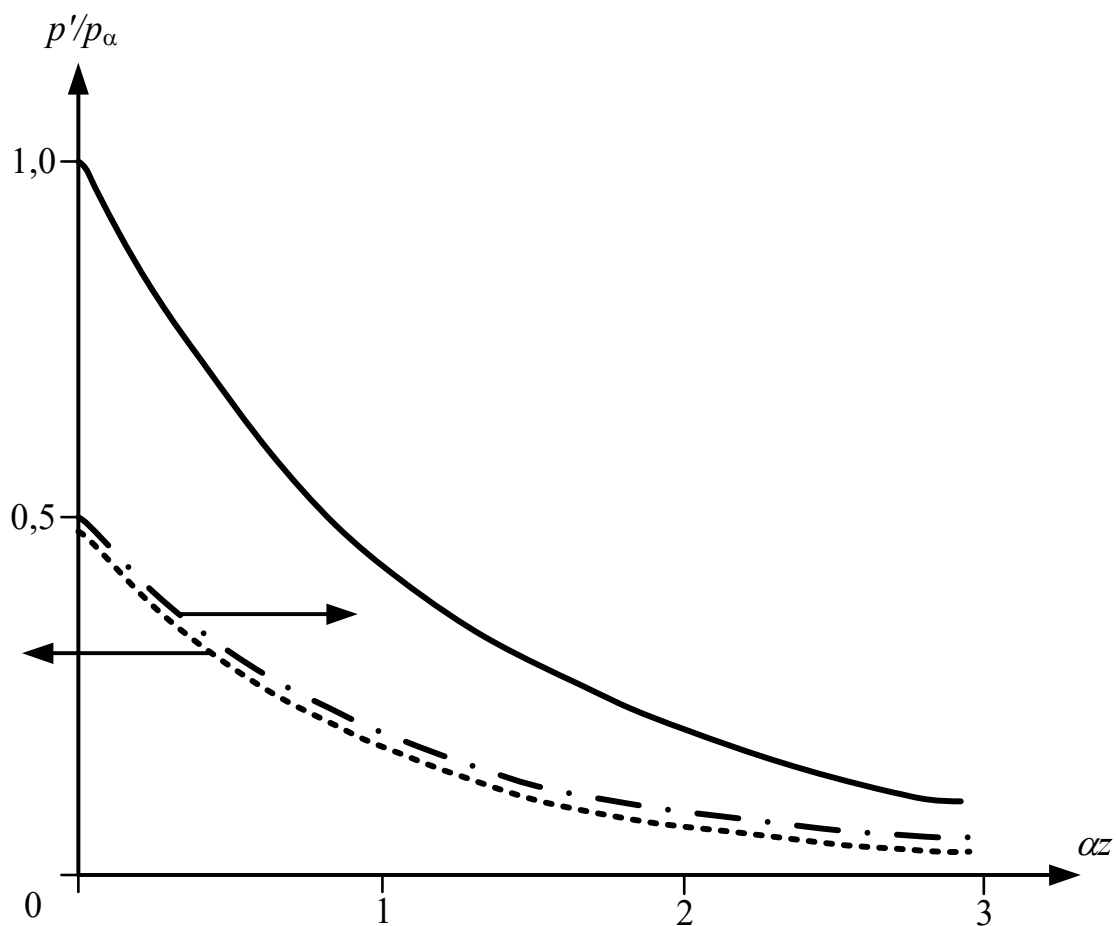
T – зміна температури;

β – температурний коефіцієнт розширення матеріалу;

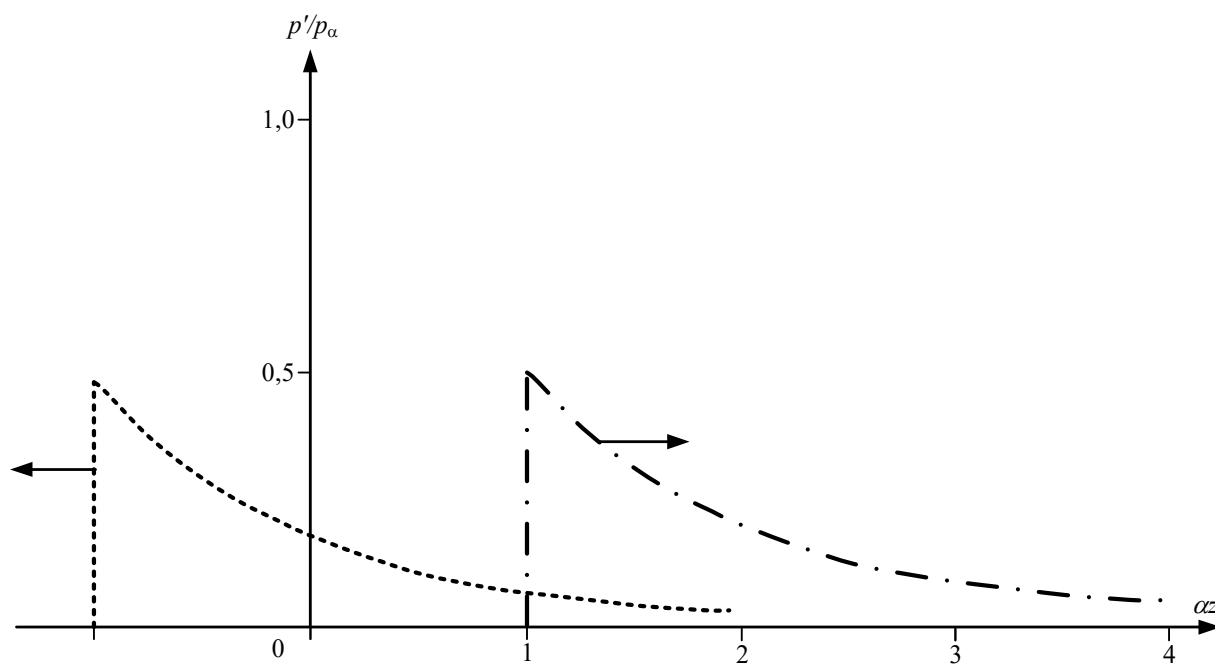
c_0 – адіабатична швидкість ультразвукових хвиль.

Профілі зміни ультразвукових хвиль або тисків у рівні моменти часу наведено на рис. 2.3, де позначено: а – в момент генерації; б – у нескінченному середовищі через деякий проміжок часу; в – у зоні стоячих ультразвукових хвиль [13]. Отже, у зоні акустичний імпульс утворюється завдяки прямої хвилі, а також хвилі, яка віддзеркалюється від межі розділу. Також на рис. 2.3 введено такі позначення: як штрихова лінія показаний імпульс, що віддзеркалюється від межі розділу, а штрихпунктирною лінією позначено імпульс, який доходить до межі розділу. Величина коефіцієнту віддзеркалення ультразвукових хвиль від межі розділу матеріалів можна розрахувати за такою формулою [15]:

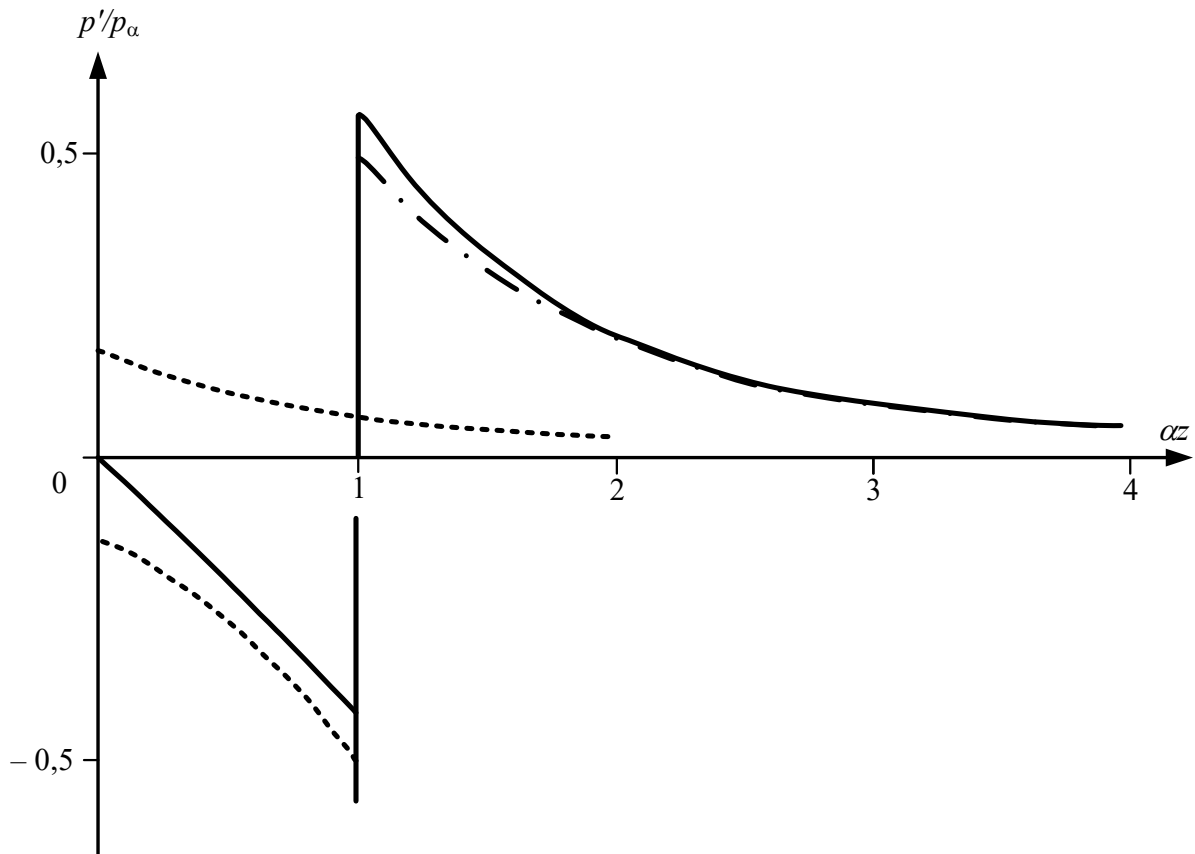
$$N = \frac{\rho_0 \cdot c_0}{\rho^{tr} \cdot c^{tr}}.$$



a)



б)



в)

Рисунок 2.3 – Профілі ультразвукової хвилі під час лазерного збудження

Проаналізуємо випадок, коли акустичний імпеданс у прозорому середовищі має більшу величину імпедансу, ніж середовище, що поглинає, тобто зворотний випадок. Відносну величину імпедансу для пар матеріалів повітря/вода/кварц та вода/алюміній/ртуть наведено в табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Відносна величина імпедансу для пар матеріалів повітря/вода/кварц та вода/алюміній/ртуть

Матеріал, що поглинає	Прозорий матеріал		
	повітря	вода	кварц
вода	$3,5 \cdot 10^3$	1	0,12
алюміній	$3,9 \cdot 10^4$	11	1,4
ртуть	$4,6 \cdot 10^4$	13	1,6

Якщо має місце короткий оптичний імпульс, то форму ультразвукової хвилі можна описати такою залежністю:

$$p' = \frac{\alpha \cdot c_0^2 \cdot \beta \cdot \varepsilon_0}{2 \cdot c_p} \cdot \begin{cases} \frac{1-N}{1+N} \cdot e^{\alpha(z-c_0 \cdot t)}, & z < c_0 \cdot t; \\ e^{-\alpha(z-c_0 \cdot t)}, & z > c_0 \cdot t. \end{cases}$$

Профілі ультразвукової хвилі, які формуються під час дії різного імпедансу матеріалу, що поглинає, наведено на рис. 2.4. Ці форми не залежить від показника N , вони ілюструють розподіл джерел тиску.

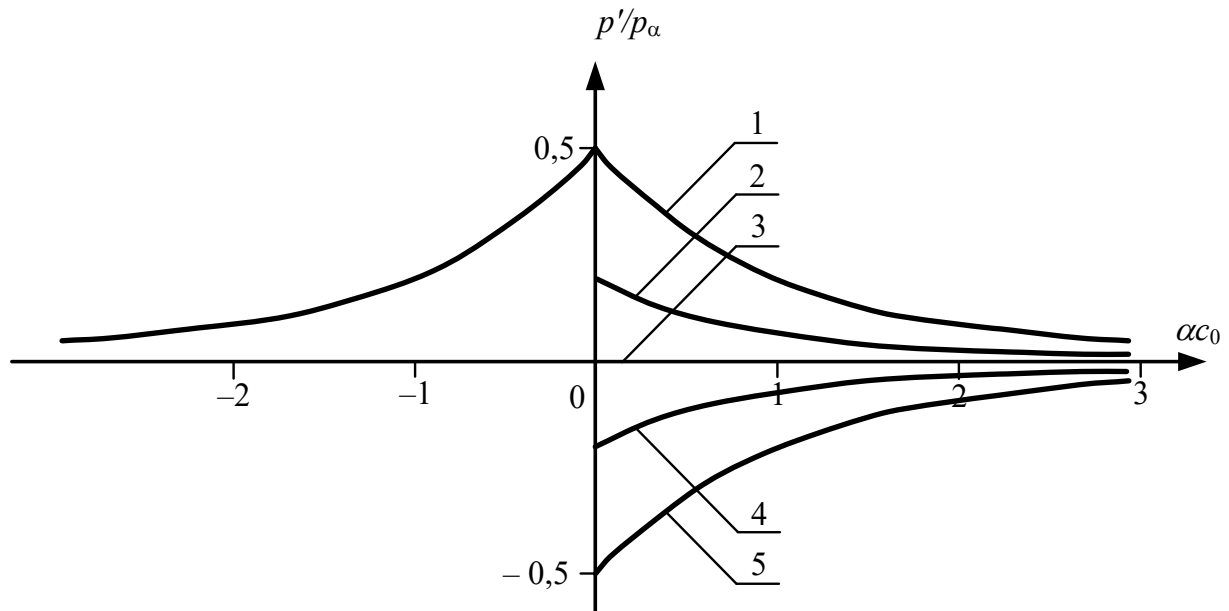


Рисунок 2.4 – Форма ультразвукових імпульсів під час дії різного імпедансу 1 – 0; 2 – 0,4; 3 – 1; 4 – 2,5; 5 – ∞

У поглинаючому середовищі, яке є однорідним, віддзеркалений ультразвуковий імпульс має профіль експоненти. Фаза цього імпульсу визначається через коефіцієнт віддзеркалення ультразвуку. Тривалість імпульсу залежить від часу проходження ультразвукових хвиль та у зоні поглинання випромінювання та визначається за таким співвідношенням:

$$(4...6) \cdot (\alpha \cdot c_0)^{-1}.$$

Отже, оптико-акустичне збудження дозволяє згенерувати сигнали, які мають різну тривалість, а також сформувати імпульси, тривалість яких складає 10^{-11} с.

Величину амплітуди сформованих сигналів можна розрахувати за таким співвідношенням:

$$p_a = \frac{\alpha \cdot c_0^2 \cdot \beta \cdot \varepsilon_0}{2 \cdot c_p} = \frac{\alpha \cdot \varepsilon_0 \cdot (\gamma - 1)}{2},$$

де γ – показник адіабати, значення якого залежить від теплової щільності $\alpha \cdot \varepsilon_0$.

Величина

$$\frac{c_0^2 \cdot \beta}{2 \cdot c_p}$$

визначається на базі параметра Грюнайзена, значення якого для матеріалів, що досліджуються наведено в табл. 2.4.

Таблиця 2.4 – Значення параметра Грюнайзена для матеріалів

Матеріал	Значення параметра $\frac{c_0^2 \cdot \beta}{2 \cdot c_p}$
Кварц	0,03
Вода	0,11
Повітря	0,42
Ацетон	0,93
Алюміній	2,1
Ртуть	2,4

Можливості генерування ультразвукових імпульсів, які мають велике значення амплітуди, а також малу тривалість зі застосуванням лазерно-ультра звукового методу істотно перевищує можливості засобів вимірювання на базі п'єзогенерування ультразвукових хвиль, що дозволяє здійснювати вимірювання швидкості розповсюдження ультразвукових хвиль з величиною абсолютної похибки вимірювання не більше 3,5 м/с [16].

До основних переваг лазерно-ультра звукового методу можна віднести аперіодичність та малу тривалість ультразвукових імпульсів. Ультразвукові імпульси, що отримано зі застосуванням лазерно-ультра звукового методу, а також п'єзоперетворювачів, наведено на рис. 2.5 – 2.7.

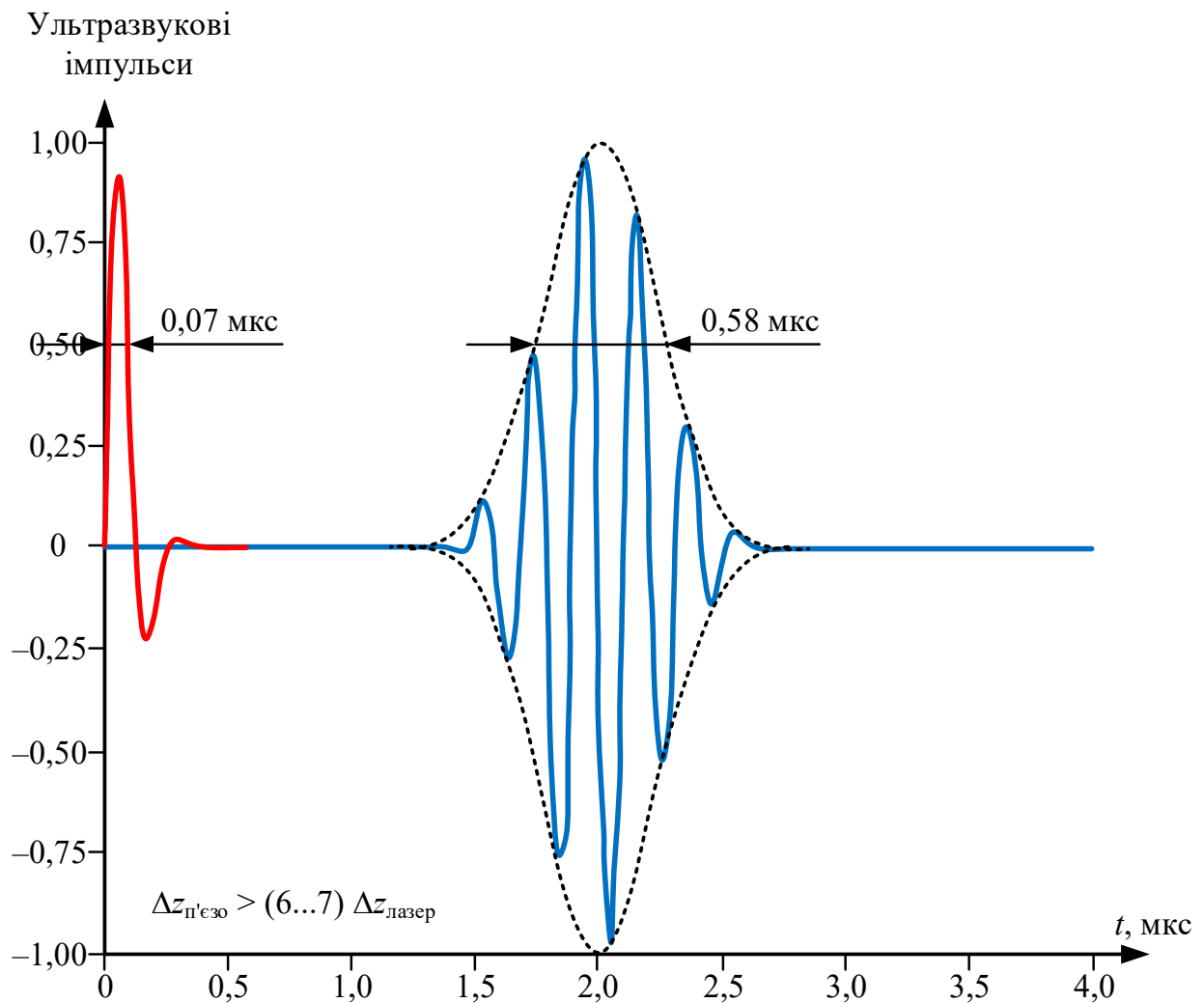


Рисунок 2.5 – Імпульси, що сформовано п'єзоелектричним (синій) та лазерно-ультра звуковим (червоний) методом

Приймання ультразвукових хвиль виконується зі застосуванням широкосмугової п'єзоплівки. Це забезпечує функціонування пристрою в доволі широкому діапазоні частот з вибором їх для різних типів матеріалів.

Генерування ультразвукового імпульсу, який має тривалість від 5 до 20 нс дозволяє зменшити вплив трансформувannya хвиль, збільшити точність вимірювання проміжку часу, а також швидкості розповсюдження ультразвукових хвиль в об'єкті дослідження.

Мінімальний діаметр потоку ультразвукових коливань, що формується, знаходиться в межах від 0,6 до 1,0 мм дозволяє підвищити чутливість та покращити метрологічні характеристики вимірювального контролю.

Отже, до переваг лазерно-ультразвукового вимірювача дефектів типу перед ультразвуковим типу УД4-Т та іншими вимірювальними пристроями, які базуються на п'єзогенеруванні ультразвукових можна віднести:

- формування аперіодичного ультразвукового імпульсу, тривалість якого змінюється в межах від 5 до 20 нс;
- форма ультразвукового імпульсу має гладкий вигляд;
- має можливість визначення знаку коефіцієнта віддзеркалення ультразвукових коливань;
- можливість здійснення вимірювального контролю з високими показниками часової роздільної здатності;
- підвищене значення чутливості;
- високі метрологічні параметри під час вимірювання швидкості ультразвукових коливань;
- оптико-акустичне формування ультразвукових коливань в об'єкті дослідження.
- під час вимірювання застосовується широкий спектр частот, навіть для виконання умови $\lambda < 0,1d$, що дає змогу мінімізувати величину розсіювання, загасання та заломлення ультразвукових коливань у матеріалі дослідження, зменшити величину спотворень та затримки ультразвукових коливань у середовищах, що контактують, спотворення форми імпульсної послідовності

через недосконалість форми та геометричних розмірів торцевої поверхні досліджуваного зразка та ін.

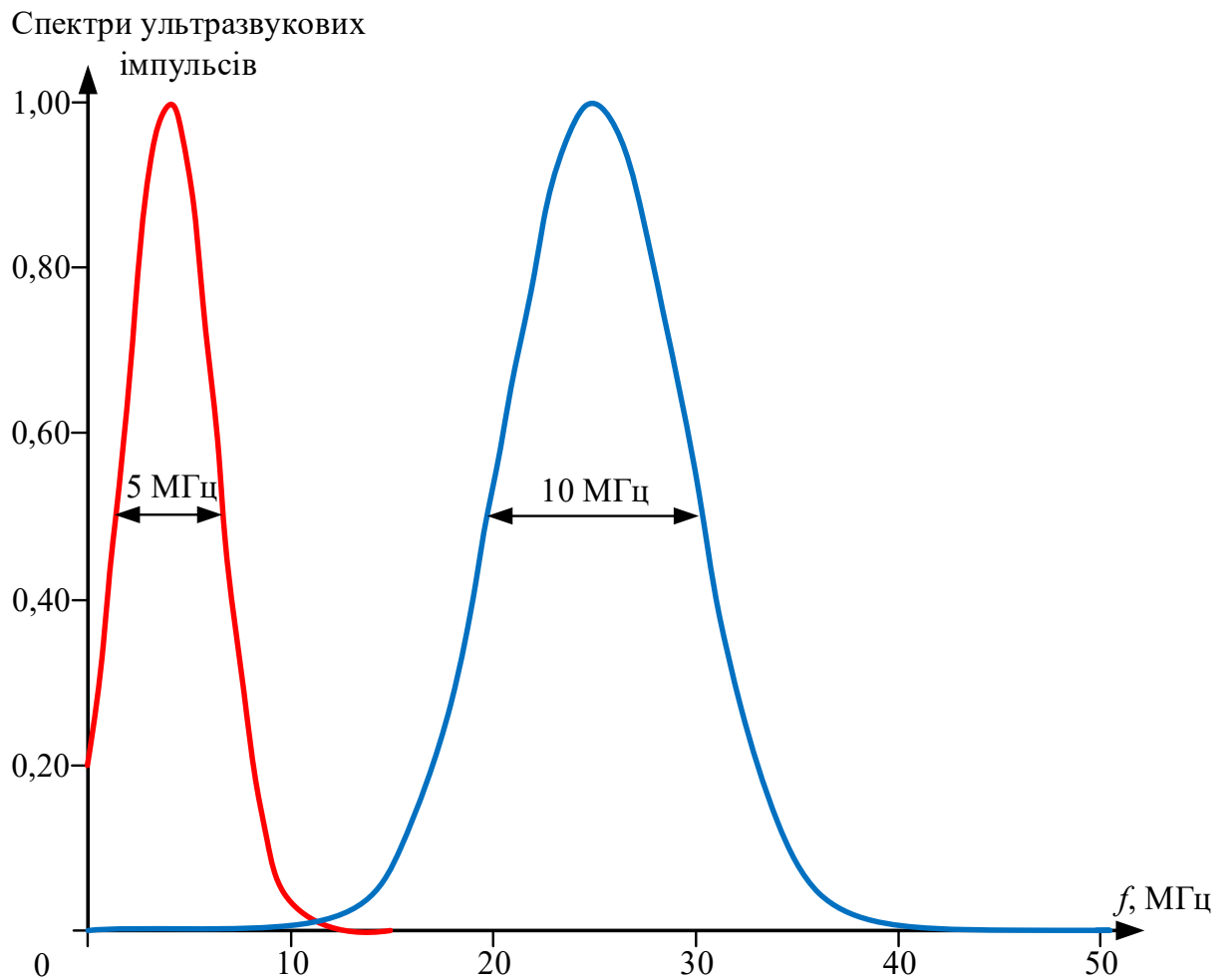


Рисунок 2.6 – Сформовані імпульси п'єзоелектричним (синій) та лазерно-ультразвуковим (червоний) методом

Лазерно-ультразвуковий вимірювач дефектів типу УДЛ-2М є засобом прецизійного вимірювального контролю швидкості розповсюдження поздовжніх ультразвукових коливань у досліджуваних зразках, які виготовлено з різних металів і сплавів, пластмас, керамічних і композиційних матеріалів під час одностороннього доступу до об'єкта вимірювального контролю.

Зазначений електронний пристрій використовується в енергетиці, машинобудуванні, авіакосмічній промисловості та ін. Під час аналізу інших засобів вимірювання виявлено, що для визначення швидкості розповсюдження

ультразвукових коливань застосовуються лабораторні пристрої, що вимагають двостороннього доступу, та не мають змогу здійснювати вимірювання швидкості розповсюдження ультразвукових коливань у металах або ці пристрої мають доволі велике значення похибки результату вимірювання.

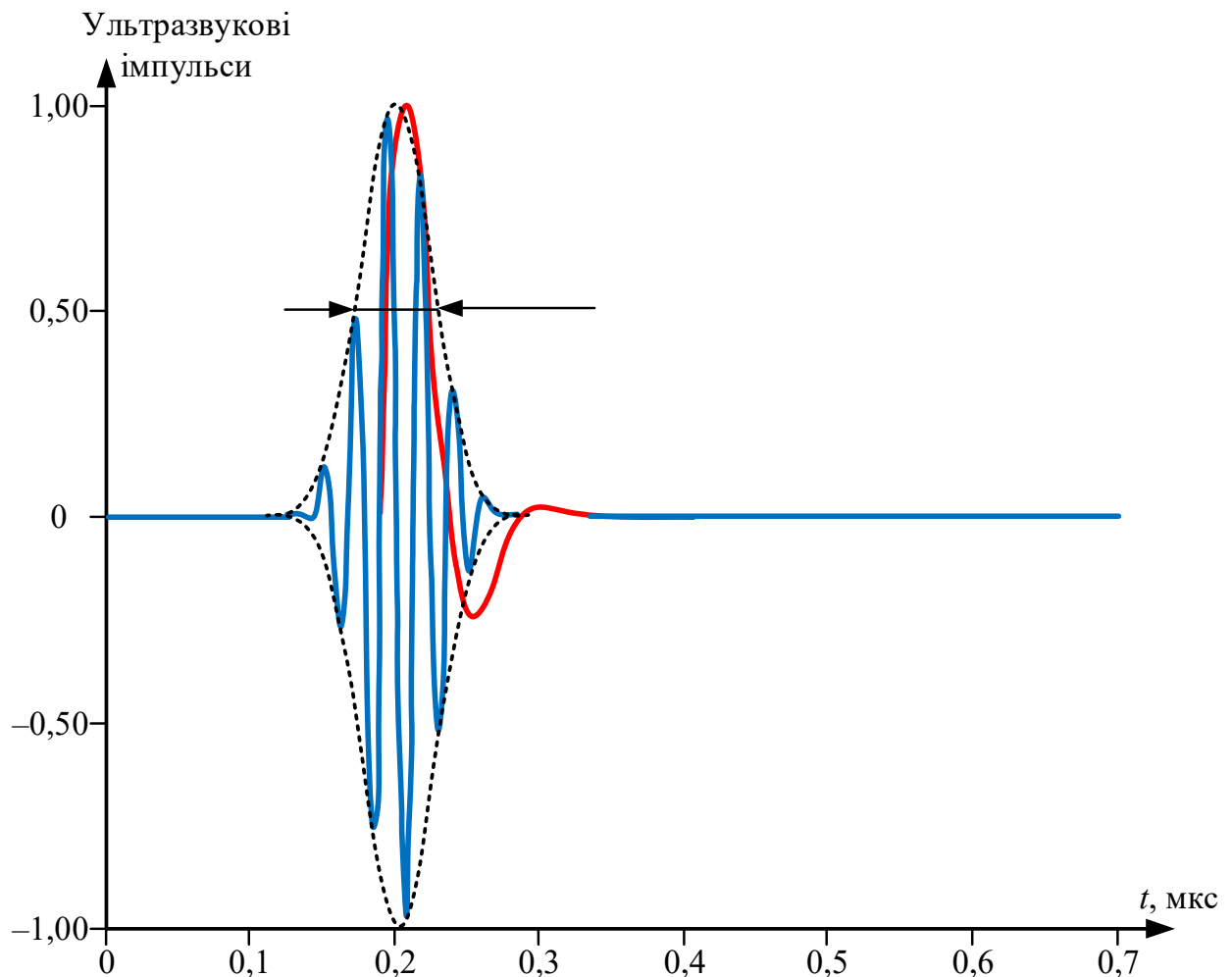


Рисунок 2.7 – Порівняння імпульсів, які отримано пьезоелектричним (синій) та лазерно-ультразвуковим (червоний) методом

З аналіз наведених недоліків і переваг вимірювального контролю зусилля затягування можна зробити висновок щодо застосування методу вимірювання швидкості розповсюдження ультразвукових коливань у різьбових з'єднаннях, який базується на лазерно-ультразвуковому детектуванні, який реалізовано у вимірювальному перетворювачі типу ПЛУ-12У-01, зовнішній вигляд якого наведено на рис. 2.8.

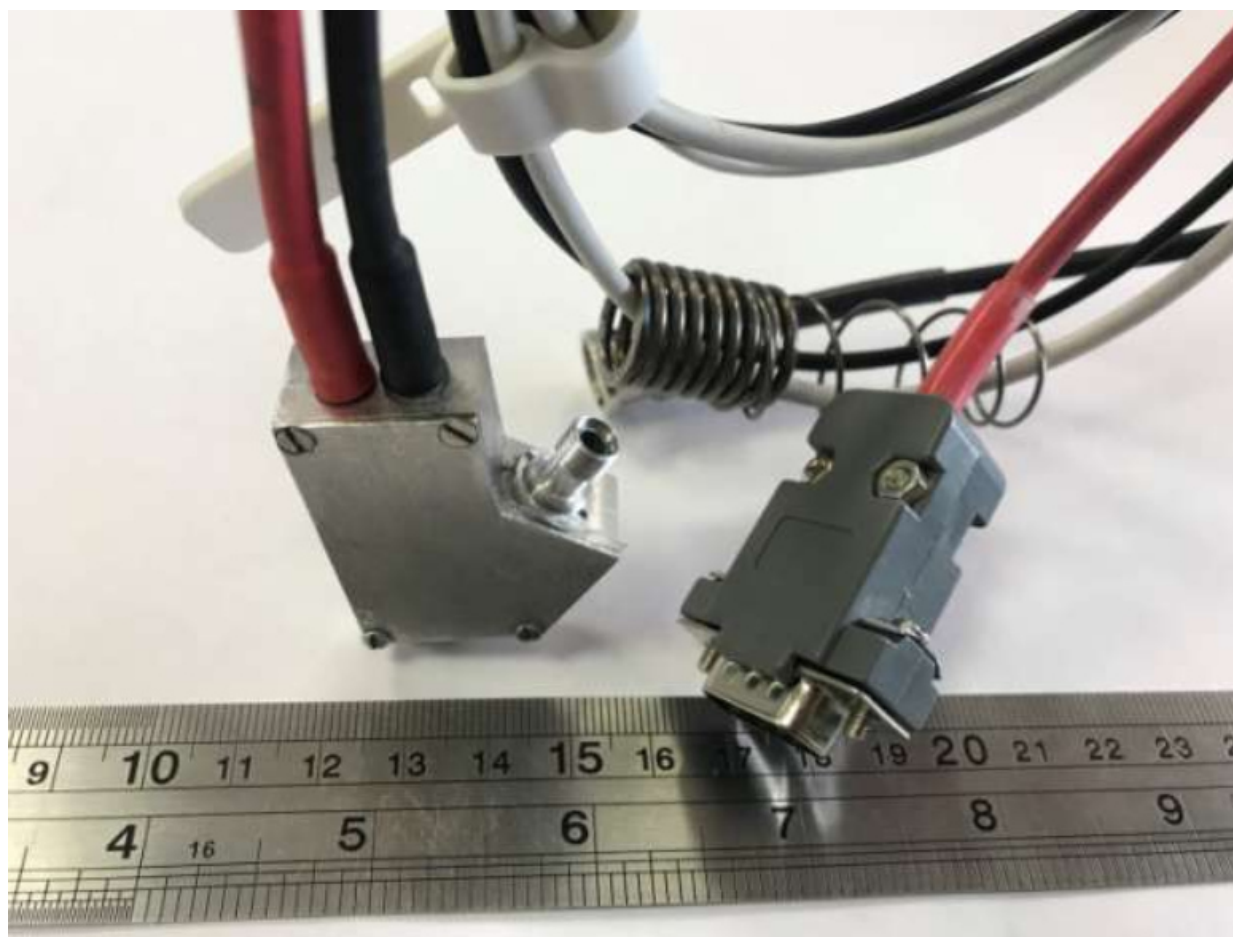


Рисунок 2.8 – Зовнішній вигляд вимірювального
перетворювача типу ПЛУ-12У-01

3 РОЗРОБКА ЕЛЕКТРОННОГО ПРИСТРОЮ ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ХВИЛЬ

Виконано обґрунтування вибору лазерно-ультразвукового технічного засобу вимірювального контролю швидкості розповсюдження ультразвукових хвиль, який має високу роздільну здатність потоку випромінювання та доволі високою точністю результату вимірювання. Необхідно виконати обґрунтування можливості цього технічного засобу вимірювання щодо введення ультразвукових коливань та визначення параметрів цього сигналу на болтах і шпильках, що мають діаметр менш ніж 8 мм, а також введення ультразвукових коливань у різьбових деталях, що мають діаметр до 30 мм під час дії співвідношення довжини та діаметру, значення якого перевищує 7, а також діаметром більше ніж 30 мм та зазначеним співвідношенням більше 10, що має змогу застосовувати розроблений засіб вимірювання для всього типу номенклатури болтів і шпильок.

Для обґрунтування застосування зазначеного засобу вимірювального контролю необхідно виконати вимірювання величини швидкості розповсюдження поздовжнього ультразвукової хвилі у деталях:

- болт типу M10, який має довжину 60,2 мм та мінімальну величину внутрішнього діаметру 7,82 мм, отже, відношення довжини до діаметра дорівнює 7,7;

- болт типу M8 має мінімальне значення внутрішнього діаметру 6,2 мм.

Зі застосуванням лазерно-ультразвукового вимірювального пристрою типу УДЛ-2М з вимірювальним перетворювачем прямого дії типу ПЛУ-12У-01, а також мікрометром типу МКЦ-25 можна виконати вимірювання швидкості розповсюдження поздовжньої ультразвукової хвилі. Вигляд ультразвукового сигналу для зазначених вище типів об'єктів дослідження наведено на рис. 3.1 та 3.2. Жовтим кольором позначено сигнал, який формується на поверхні болтів, в червоним показано віддзеркалений сигнал від протилежного торця.

Сигнали мають стійкі параметри, рівень який істотно більше ніж рівень шумів, що дозволяє виконувати вимірювальний контроль швидкості розповсюдження поздовжньої ультразвукової хвилі для наведених вище болтів.

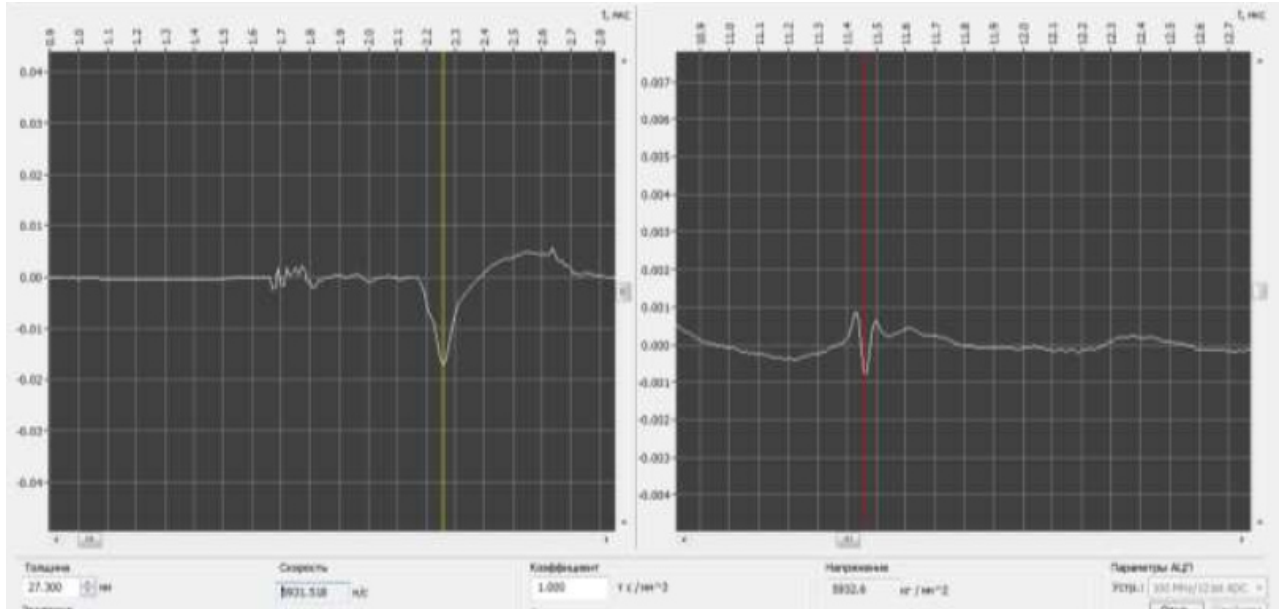


Рисунок 3.1 – Сигнали вимірювання швидкості розповсюдження ультразвукових хвиль на болті типу М8-6ех22.26.11

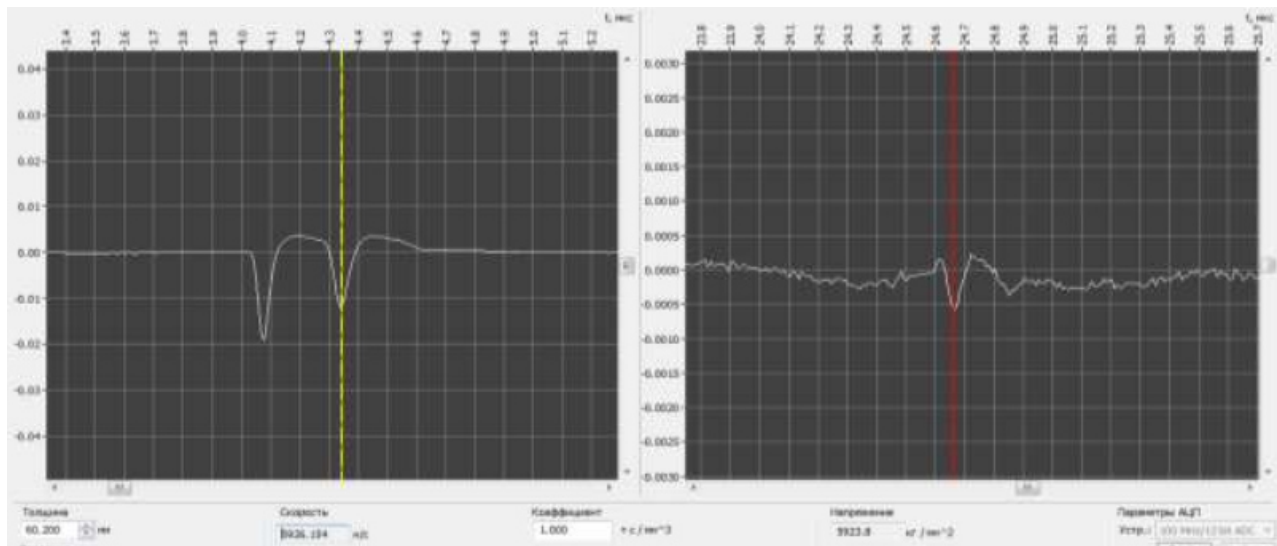


Рисунок 3.2 – Сигнали вимірювання швидкості розповсюдження ультразвукових хвиль на болті типу М10-6ех56.26.11

Для перевірки працездатності описаного методу на номенклатурі болтів і шпильок виконано математичне моделювання розповсюдження ультразвукових хвиль у виробах, які мають різний типовий розмір.

Зі застосуванням методів математичного моделювання необхідно визначити величини напружень, що мають місце під час дії навантажень на деталі, що неможливо здійснити без застосування експериментальних досліджень вимірювання показників для реальних деталей. Проте, застосування нових методів інженерних досліджень дозволить розв'язати завдання процесів формування та розповсюдження ультразвукових хвиль. Використання програмних комплексів комп'ютерного моделювання дозволить здійснювати зазначені розрахунки доволі швидко, що істотно спрощує розробку математичної моделі. [17]. У випускній кваліфікаційній роботі розглядається розповсюдження ультразвукових хвиль у ненавантажених деталях, а також здійснюється порівняльний аналіз можливості ультразвукових засобів вимірювання з п'єзоелектричним та лазерним генерування ультразвукових коливань.

У різьбових з'єднань має місце різний діаметр та крок різьблення. Для отримання очікуваної фізичної поведінки ультразвукових коливань в об'єкті вимірювального контролю під час віддзеркалення коливань від витків різьблення необхідно для здійснення математичного моделювання застосувати деталізовану 3D модель шпильки. Зазначена модель дозволяє детально розглянути розповсюдження ультразвукових хвиль на витках різьблення. Проте, має місце збільшення кількості кінцевих елементів математичної моделі, що істотно збільшує трудомісткість моделювання.

Математичне моделювання у випускній кваліфікаційній роботі бакалавра проводилось в програмному середовищі COMSOL Multiphysics. Розроблено математичну модель розповсюдження ультразвукових коливань у шпильках, які мають різні типові розміри, які вибрано з номенклатурного ряду, що регламентується ДСТУ 22042-76 у відповідності до таких розроблених вимог:

– мінімальна та максимальна довжина деталі, що досліджується;

- мінімальний та максимальний діаметр різьблення;
- відношення довжини шпильки до її діаметра, значення якого складає менше 7, а також знаходиться в межах від 7 до 10, й більше 10.
- матеріал, з яких виготовлено деталі 30ХГСА.

Швидкість розповсюдження поздовжніх ультразвукових хвиль під час дії температури 20°C без прикладених зусиль на розтягування дорівнює 5900 м/с.

Характеристики розповсюдження пружного збурення, яке має місце в твердому тілі, описуються відомим диференціальним рівнянням Ламе:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu) \cdot \text{grad div } u + \mu \cdot \Delta u,$$

де λ та μ – постійні величини Ламе;

ρ – щільність середовища, що досліджується;

$u = (u_x, u_y)$ – вектор зсуву частинки.

Математичне моделювання формування ультразвукової хвилі здійснюється на поверхні моделі, яка має діаметр акустичного потоку для п'єзоелектричного генерування 4, 6, 12 мм [4] на частотах $f = 15, 10, 5$ МГц. Діаметр акустичної променю для лазерно-ультразвукового генерування дорівнює – 1 мм, діапазон частот складає до 10 МГц.

Під час математичного моделювання п'єзоелектричного генерування ультразвукових хвиль застосовуються короткі радіоімпульси, що є коливаннями з огинаючою у вигляді дзвону, яку можна описати такою аналітичною залежністю:

$$A(t) = e^{-\frac{t^2}{2\Delta t^2}} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot t),$$

де f_c – центральна частота коливань;

Δt – характерна тривалість огинаючої радіоімпульсу, с.

Об'ємне зображення форми радіоімпульсу наведено на рис. 3.3.

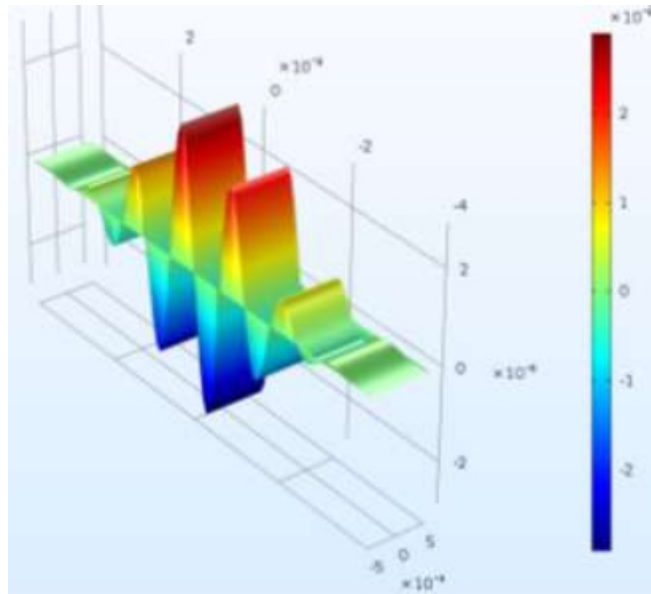


Рисунок 3.3 – Об'ємне зображення форми радіоімпульсу

Під час моделювання формування лазерно-ультразвукових хвиль форму надкоротких імпульсів можна описати функцією, яка є першою похідною від функції розподілу Гауса:

$$A(t) = A_0 \cdot \sqrt{2 \cdot e} \cdot \frac{t}{\Delta t} \cdot e^{-\frac{t^2}{\Delta t^2}},$$

де A_0 – амплітуда імпульсу;

Δt – тривалість імпульсу.

Об'ємне зображення форми надкороткого імпульсу наведено на рис. 3.4.

Розв'язання рівняння виконувалося в часовому інтервалі від 0 до 1900 мкс, що залежало від довжини досліджуваного зразка, з кроком за часом 10^{-7} мкс. За цей проміжок часу ультразвукова хвиля розповсюджувалась до протилежного торця математичної моделі об'єкта та поверталась у протилежному напрямку. Під час моделювання отримано залежності переміщення в різні проміжки часу, що наведено на рис. 3.5.

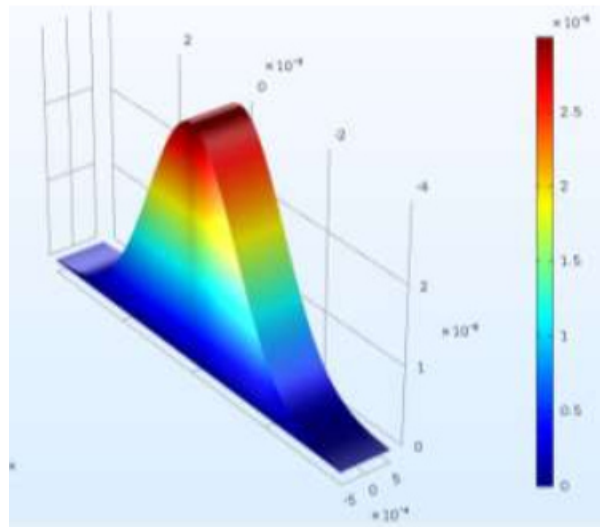


Рисунок 3.4 – Об’ємне зображення форми надкороткого імпульсу

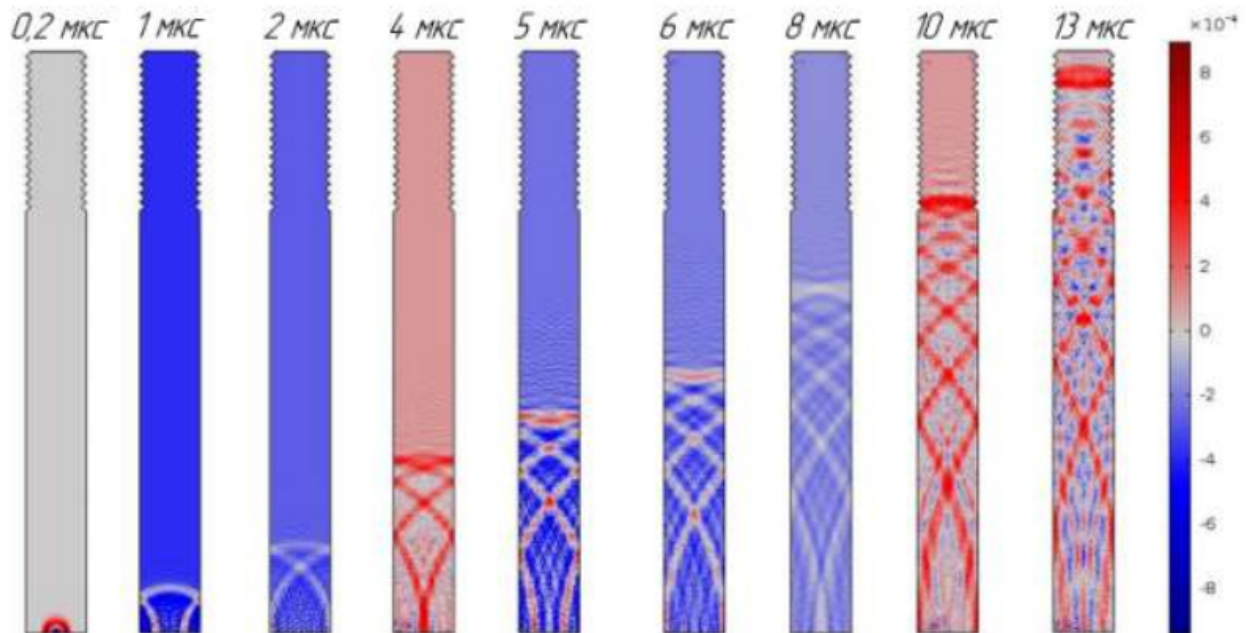


Рисунок 3.5 – Залежності переміщення в різні проміжки часу

Під час математичного моделювання отримано сигнал, що зареєстрований як результат опромінювання шпильки 8×20 мм п’єзоелектричним ультразвуковим коливанням, наведений на рис. 3.6. Схожі результати моделювання отримані для лазерно-ультразвукового методу.

На рис. 3.7 – 3.10 наведено залежності зміни ультразвукового імпульсу в часовій розгортці під час моделювання п’єзоелектричної та лазерно-ультразвукової генерації коливань на різних частотах.

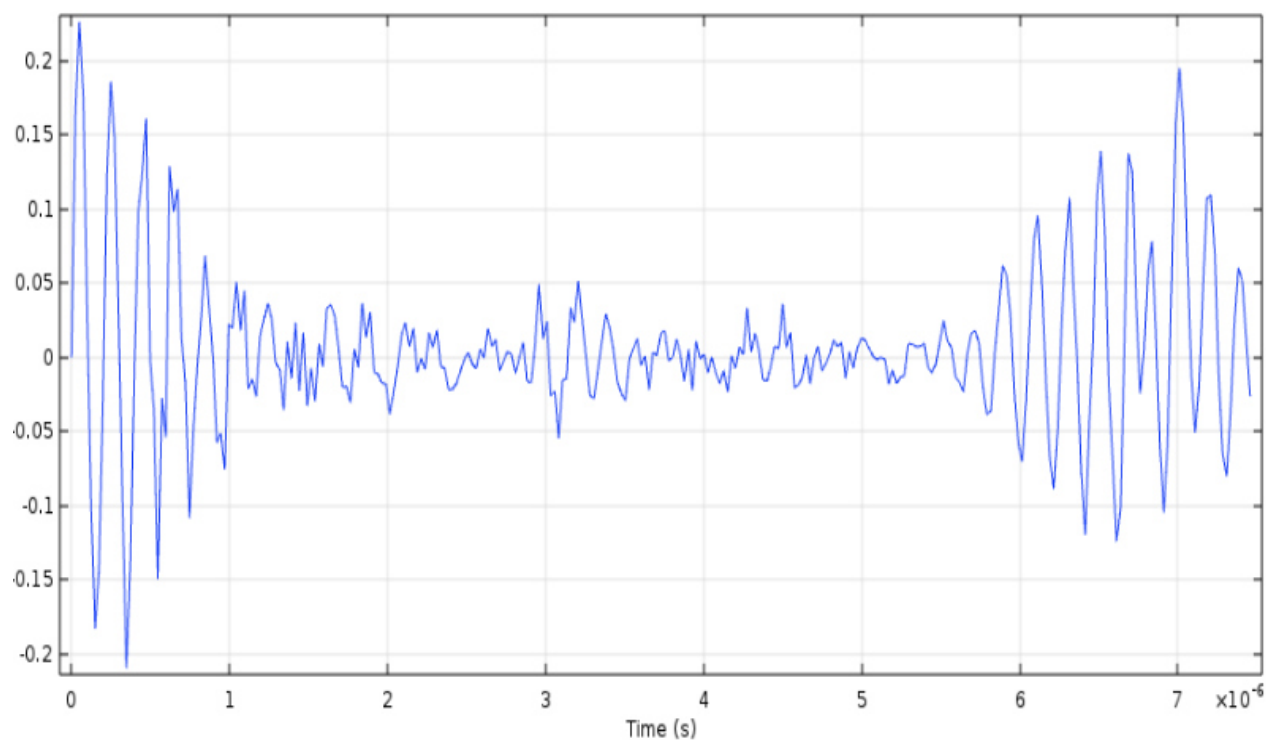


Рисунок 3.6 – Сигнал, що зареєстровано під час опромінювання шпильки 8×20 мм п'єзоелектричною генерацією ультразвукової хвилі

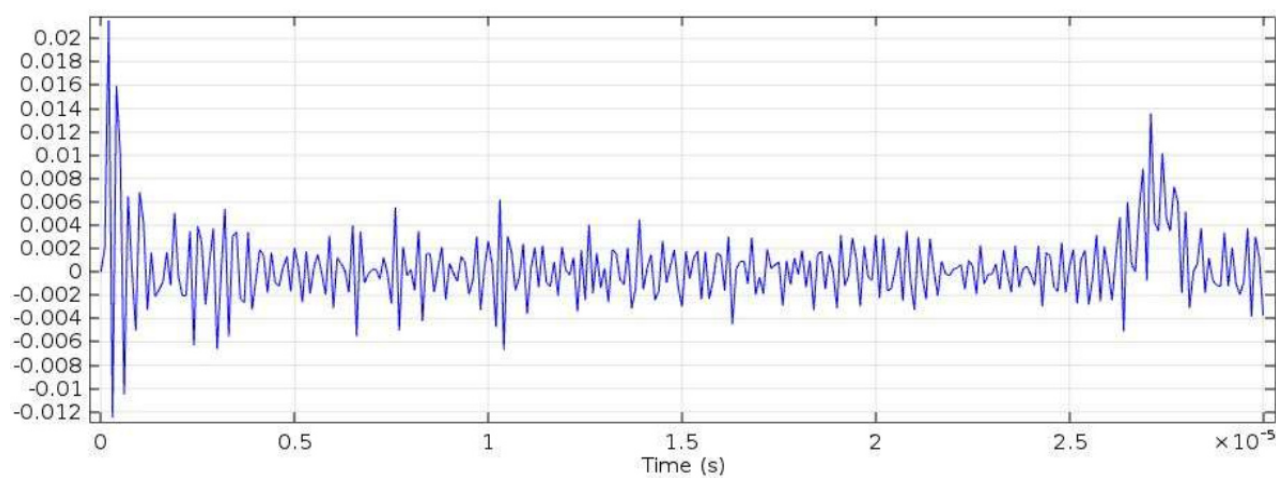


Рисунок 3.7 – Сигнал надходження ультразвукової хвилі під час п'єзоелектричного генерування на частоті 5 МГц, тривалість імпульсу складає 600 нс, а діаметр потоку випромінювання 12 мм

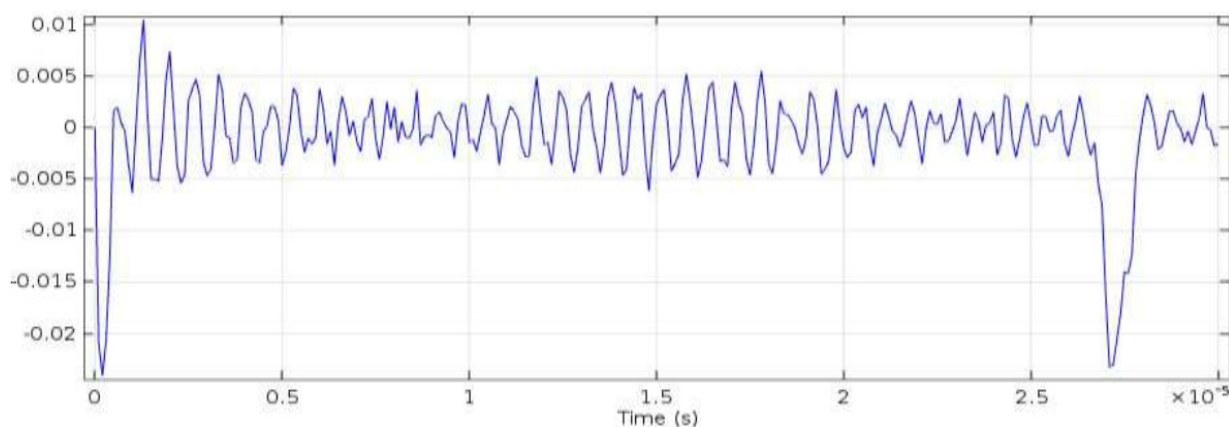


Рисунок 3.8 – Сигнал надходження ультразвукової хвилі під час п'єзогенерування на частоті 10 МГц, тривалість імпульсу 400 нс, а діаметр потоку випромінювання 6 мм

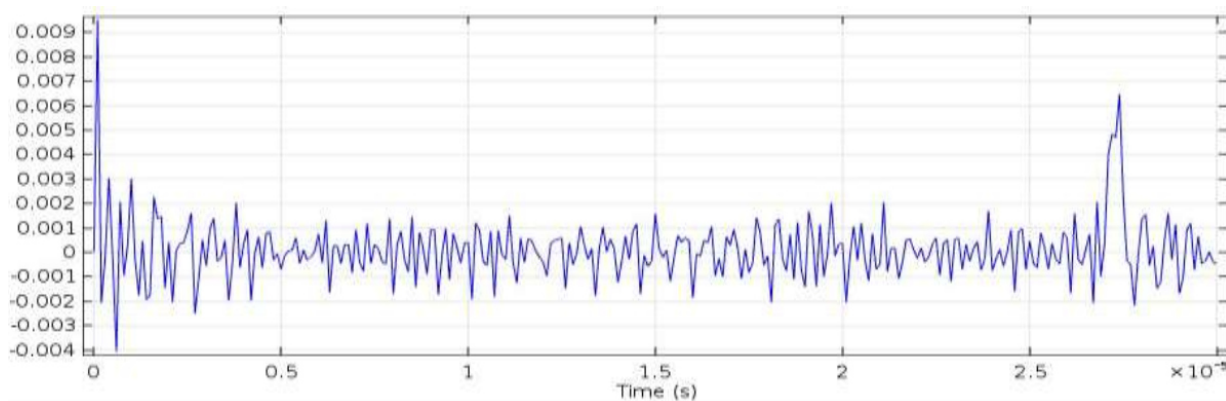


Рисунок 3.9 – Сигнал надходження ультразвукової хвилі під час п'єзогенерування на частоті 15 МГц, тривалість імпульсу 100 нс, а діаметр потоку випромінювання 4 мм

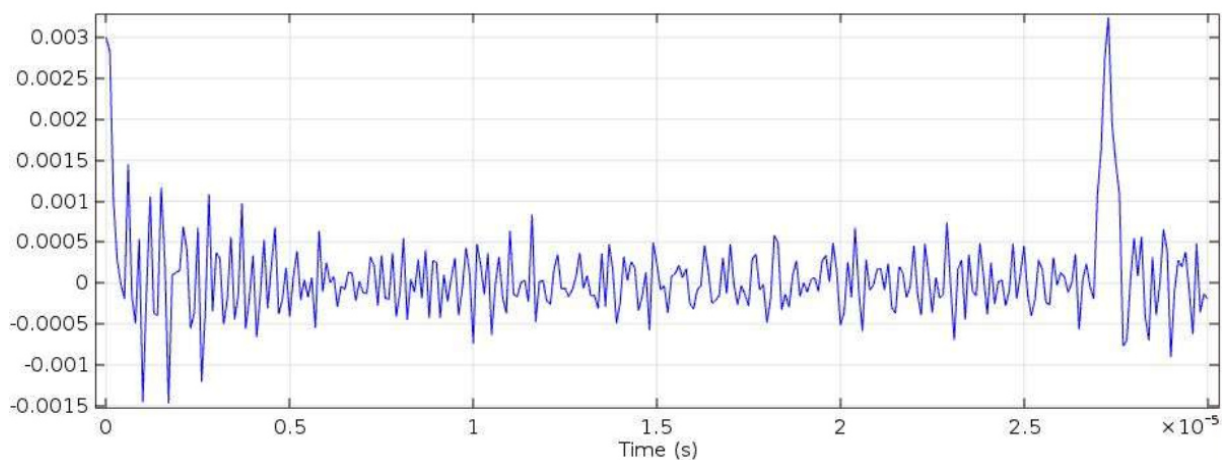


Рисунок 3.10 – Сигнал надходження ультразвукової хвилі під час лазерного генерування на частоті 10 МГц діаметр потоку 1 мм

З аналізу результатів математичного моделювання встановлено, що відношення сигнал/шум отриманого сигналу, який реєструється під час опромінюванні деталі, що має відношення довжини до її діаметра більше ніж 7 для п'єзоелектричного генерування становить від 4 до 7,5 дБ, ці значення є меншими, ніж під час застосування лазерно-ультразвукової генерації.

Сигнал, реєстрація якого здійснюється п'єзоелектричними вимірювальними пристроями, має кілька локальних максимумів та збільшену тривалість. У реальних умовах експлуатації характеристики п'єзоелектричних перетворювачів відрізняються від результатів математичного моделювання через наявність додаткового розділення середовищ призма-об'єкт вимірювального контролю, а також збільшену величину бази опромінювання. Застосування вимірювальних перетворювачів на більш високе значення частоти не дозволяє здійснювати вимірювальний контроль деталей, які мають більшу довжини через швидше загасання сигналу випромінювання, що має місце в матеріалі досліджуваного об'єкта.

ВИСНОВКИ

Під час обґрунтування та вибору засобів акустичної тензометрії різьбових з'єднань виявлено такі переваги лазерно-ультразвукового вимірювального пристрою типу УДЛ-2М серед ультразвукових дефектоскопів з п'єзоелектричним генерування хвиль: можливість формування аперіодичного ультразвукового імпульсу, тривалість якого може змінюватися в межах від 5 до 20 нс; форма ультразвукового імпульсу має гладкий вид; інформація щодо зміни знаку коефіцієнта віддзеркалення ультразвукових коливань; можливість здійснювати вимірювальний контроль з високою часовою роздільною здатністю; збільшена величина чутливості; високі метрологічні показники вимірювального контроль швидкості ультразвукових коливань; оптико-акустичне формування ультразвукових хвиль в об'єкті дослідження дозволяє застосовувати доволі розширений спектр частот, що зменшує вплив заломлення, розсіювання та загасання ультразвукових коливань у матеріалі деталей, що досліджуються, затримка та спотворення ультразвукових коливань у контактних середовищах, зміна параметрів імпульсу через недосконалість торцевих поверхонь досліджуваного зразка та ін.

Розробка електронних пристроїв акустичної тензометрії різьбових деталей базується на лазерно-ультразвуковому дефектоскопі, який має високу роздільну здатність випромінювання та низьку величину похибки результату вимірювання.

Виконано моделювання розповсюдження ультразвукових коливань у шпильках, які мають різний типовий розмір. Під час моделювання доказано можливість застосування розробленого засобу вимірювання для реєстрації ультразвукових сигналів у шпильках та болтах, діаметр яких становить менше 8 мм, а також з діаметром до 30 мм, якщо відношення довжини до їх діаметра складає більше ніж 7, якщо діаметр більше 30 мм, то відношення може бути більше 10, для розглянутої номенклатури шпильок та болтів.

З аналізу результатів математичного моделювання встановлено, що відношення сигнал/шум отриманого сигналу, який реєструється під час опромінюванні деталі, що має відношення довжини до її діаметра більше ніж 7 для п'єзоелектричного генерування становить від 4 до 7,5 дБ, ці значення є меншими, ніж під час застосування лазерно-ультразвукової генерації.

Сигнал, реєстрація якого здійснюється п'єзоелектричними вимірювальними пристроями, має кілька локальних максимумів та збільшену тривалість. У реальних умовах експлуатації характеристики п'єзоелектричних перетворювачів відрізняються від результатів математичного моделювання через наявність додаткового розділення середовищ призма-об'єкт вимірювального контролю, а також збільшену величину бази опромінювання. Застосування вимірювальних перетворювачів на більш високе значення частоти не дозволяє здійснювати вимірювальний контроль деталей, які мають більшу довжину через швидше загасання сигналу випромінювання, що має місце в матеріалі досліджуваного об'єкта.

Під час аналізу результатів математичного моделювання встановлено якісну перевагу лазерно-ультразвукового методу вимірювального контролю шпильок і болтів з малим діаметром і доволі великим відношенням довжини до їх діаметра: високе значення відношення сигнал/шум, сигнал має максимум без спотворення його форми, амплітудне значення лінійно збільшується. Виконано математичне моделювання розповсюдження ультразвукових коливань під час зміни характеристик і параметрів вимірювального перетворювача, та вибрано оптимальні конструктивні рішення електронного пристрою вимірювання механічної напруженості різьбових з'єднань.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Никитин, А.Н. Технология сборки двигателей летательных аппаратов / А.Н. Никитин. – М.: Машиностроение, 1982. – 269 с.
2. Николенко, Л.К. Сборка реактивных двигателей / Л.К. Николенко, В.И. Соколов. – М.: Оборонгиз, 1956. – 276 с.
3. Орлов, К.Я. Ремонт самолетов и вертолетов: Учебник для авиационных училищ / К.Я. Орлов, В.А. Пархимович. – М.: Транспорт, 1986. – 295 с.
4. Корнилович, С.А. Пути обеспечения плотности стыка резьбовых соединений при производстве, техническом обслуживании и ремонте машин сельскохозяйственного назначения / С.А. Корнилович, В. Соловьев // Омский научный вестник, 2013. – № 1(117). – С. 68 – 71.
5. Иосилевич, Г.Б. Прикладная механика / Г.Б. Иосилевич, Г.Б. Строганов, Г.С. Маслов. – М.: Высшая школа, 1989. – 351 с.
6. Измайлов, В.В. Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования / В.В. Измайлов. – Тверь: ТГТУ, 2011. – 144 с.
7. Соловьев, В.Л. Повышение точности контроля усилия затяжки при сборке групповых резьбовых соединений / В.Л. Соловьев // Вестник СиБАДИ, 2013. – № 3(31). – С. 67 – 70.
8. Куклин, Н.Г. Детали машин / Н.Г. Куклин, Г.С. Куклина. – М.: Высшая школа, 1987. – 383 с.
9. Александров, А.В. Основы теории упругости и пластичности / А.В. Александров, В.Д. Потапов. – М.: Высшая школа, 1990 – 400 с.
10. Скупчик, Е. Основы акустики / Е. Скупчик. – М.: Мир, 1976. – 238 с.
11. Лепендин, Л.Ф. Акустика / Л.Ф. Лепендин. – М.: Высшая школа, 1978. – 365 с.
12. Chatellier, J. A new method determining acoustoelastic constants and plane stresses in textured thin plates / J. Chatellier, M. Touratier // J Acoust. Sce. Am,

1988. – № 63(1). – Р. 109 – 117.

13. Гусев, В.Э. Лазерная оптоакустика / В.Э. Гусев, А.А. Карабутов.- М.: Наука, 1991. – 304 с.

14. Карабутов, А.А. Измерение оптических характеристик рассеивающих сред оптико-акустическим методом / А.А. Карабутов, И.М. Пеливанов, Н.Б. Подымова и др. // Квантовая электроника, 1999. – № 3. – С. 215 – 220.

15. Никитина, Н.Е. Исследование двухосного напряженного состояния трубной плети прибором «АСТРОН» / Н.Е. Никитина, С.В. Казачек, А.В. Камышев и др. // В мире неразрушающего контроля., 2005. – № 1(27). – С. 33-35.

16. Быченко, В.А. Применение лазерно-ультразвукового генератора для определения напряженно-деформированного состояния специальных материалов изделий / В.А. Быченко, И.Ю. Кинжагулов, И.В. Беркутов и др. // Научно-технический вестник, 2013. – № 4(86). – С. 107 – 114.

17. Кунву, Л. Основы САПР (CAD/CAM/CAE) / Л. Кунву. – СПб: Питер, 2004. – 560 с.

ДОДАТОК А – Охорона праці та безпека під час надзвичайних ситуаціях на підприємстві

До приміщення науково-дослідного відділу та організації робочого місця з обліком шкідливих виробничих факторів пред'являється ряд вимог. Приміщення, в якому знаходиться робоче місце з персональним комп'ютером, повинно мати природне освітлення, бажано з однобічним розміщенням світових прорізів, площа осклянілості яких не повинна перевищувати 25 % від площі стіни світових прорізів. Віконні прорізи в приміщенні з персональним комп'ютером повинні мати регульовані жалюзі чи занавіски або інші сонцезахисні пристрої. Не допускається розташування робочих місць з персональним комп'ютером у підвальних і цокольних поверхах. Робочі місця з персональними комп'ютерами рекомендується розміщувати в окремих приміщеннях. Площа на одного працюючого з персональним комп'ютером повинна складати 6 м², об'єм – 20 м³. Неприпустиме розташування персонального комп'ютера, під час якого працюючий звернений обличчям або спиною до вікон чи кімнати задньої частини персонального комп'ютера, де монтуються вентилятори.

Забороняється застосовувати для обробки інтер'єра приміщень з персональними комп'ютерами полімерні матеріали (дерев'яностружечні плити, шпалери, що миються, плівкові та рулоні синтетичні матеріали, шаруватий паперовий пластик та ін.), що виділяються в повітря шкідливі хімічні речовини, що перевищують гранично допустимі концентрації, не включені до «Переліку дозволених, МЗ» 1977-1985 р.

У лабораторії вимірювальної техніки та науково-дослідної роботи робочі місця з персональними комп'ютерами розташовані від стіни з вікнами на відстані 1 м, відстань між столами 3 м. Екрани моніторів знаходяться від очей користувача на відстані 700 мм відповідно до СН 512-78, приміщення ($S=21 \text{ м}^2$, $V=73,5 \text{ м}^3$) дозволяє розташовувати більше 3 робочих місця.

Робочі місця в положенні сидячі відповідають вимогам ДСТ 12.2.032 – 78 та ДСТ 12.2.029 – 77. Поверхня робочого столу знаходиться на висоті 0,75 м від підлоги, розміри робочої поверхні стільниці складають 1050x590 міліметрів, розміри вільного простору для ніг під столом складає висота 650, глибина 550, ширина 450 міліметрів, відповідно. Робочий стілець оснащений підйомно-поворотним пристроєм, що забезпечує регуляцію висоти сидіння та спинки, пневматичним і гідравлічними амортизаторами та обладнанні підлокітниками.

А.1 Мікроклімат робочого місця

У приміщенні науково-дослідного відділу є джерела тепловиділення, тому необхідно визначити необхідні умови його вентильовання. Витрати повітря в приміщенні з додатковим тепловиділенням визначаються за формулою:

$$L = \frac{Q_{\text{НАД}}}{c \cdot p \cdot (t_{\text{В}} - t_{\text{Н}})}, \quad (\text{A.1})$$

де $Q_{\text{НАД}}$ – надлишкове виділення тепла в робочому приміщенні, ккал/год.;

c – теплоємність повітря (0,237 ккал/кг);

p – об'ємна вага повітря (1,226 кг/м³);

$t_{\text{В}}$ – температура витяжного повітря (30°C);

$t_{\text{Н}}$ – температура приточного повітря (20°C).

Розраховується надлишкове надходження тепла за формулою:

$$Q_{\text{НАД}} = Q_{\text{УСТ}} + Q_{\text{ПЕР}} + Q_{\text{ОСВ}} + Q_{\text{СР}}, \quad (\text{A.2})$$

де $Q_{\text{уст}}$ – виділення тепла від устаткування;

$Q_{\text{пер}}$ – виділення тепла від персоналу;

$Q_{\text{осв}}$ – надходження тепла від електричного освітлення;

$Q_{\text{ср}}$ – надходження тепла від сонячної радіації через вікна.

Визначається виділення тепла від устаткування за формулою:

$$Q_{\text{уст}} = P \cdot K_a \cdot K_6 \cdot 860, \quad (\text{A.3})$$

де P – сумарна потужність устаткування, кВт/год;

K_a – коефіцієнт установленної потужності (0,95);

K_6 – коефіцієнт одночасної роботи (1,0).

$$\begin{aligned} Q_{\text{уст}} &= [x_1 \cdot k_1 + x_2 \cdot k_2 + x_3 \cdot k_3 + x_4 \cdot k_4 + x_5 \cdot k_5 + x_6 \cdot k_6 + x_7 \cdot k_7 + \\ &+ x_8 \cdot k_8 + x_9 \cdot k_9] \cdot K_a \cdot K_6 \cdot 860 = \\ &= [1 \cdot 0,5 + 1 \cdot 0,1 + 1 \cdot 0,07 + 2 \cdot 0,4 + 1 \cdot 0,06 + 1 \cdot 0,05 + 1 \cdot 0,6 + 4 \cdot 0,15 + \\ &+ 1 \cdot 3,5] \cdot 0,95 \cdot 1 \cdot 860 = 5131 \text{ ккал/год.} \end{aligned}$$

Визначається виділення тепла від обслуговуючого персоналу за допомогою формули:

$$Q_{\text{пер}} = n \cdot g = 2 \cdot 100 = 200 \text{ ккал/год,} \quad (\text{A.4})$$

де n – кількість працюючих;

g – кількість тепла, що виділяє один працівник за годину (100 ккал/год.).

Визначається надходження тепла від електричного освітлення за формулою:

$$Q_{\text{осв}} = E_m \cdot g_1 \cdot S = 300 \cdot 0,05 \cdot 21 = 315 \text{ ккал/год,} \quad (\text{A.5})$$

де E_M – нормована освітленість для зорової роботи, величина якої дорівнює 300 лк;

g_1 – питома тепловиділення на 1 м² підлоги під час освітленості в 1 лк (для люмінесцентних ламп – 0,05 ккал/год.);

S – площа приміщення, м².

Визначається надходження тепла від сонячної радіації через вікна за формулою:

$$Q_{CP} = F \cdot g_2 \cdot K_{OCL} = 7,5 \cdot 65 \cdot 0,4 = 195 \text{ ккал/год}, \quad (A.6)$$

де F – площа віконних прорізів (3 x 2,5=7,5 м²);

g_2 – кількість тепла, що надходить через 1 м² віконного прорізу (65 ккал/год.);

K_{OCL} – коефіцієнт ослаблення, приймається 0,4.

Визначається кількість надлишкового тепла:

$$Q_{HAД} = Q_{УСТ} + Q_{ПЕР} + Q_{OCB} + Q_{CP} = 5131 + 200 + 315 + 195 = 5841 \text{ ккал/год.}$$

Визначаються витрати повітря в приміщенні:

$$L = \frac{Q_{HAД}}{c \cdot p \cdot (t_B - t_H)} = \frac{5848}{0,237 \cdot 1,226 \cdot (30 - 20)} = 2010 \text{ м}^3 / \text{год.}$$

Існуюча в наявності система кондиціонування та вентилявання має продуктивність 2200 м³/год., що задовольняє необхідним нормативам.

Параметри мікроклімату на робочих місцях регламентуються ДНАОП 0.03.3.15 – 86 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень № 4088–86». Відповідно доданих санітарних норм температура повітря, швидкість руху повітря та відносна вологість у холодні періоди року повинна складати

(22 – 24) градуса за Цельсієм, 0,1 метра в секунду та (40 – 60) %, відповідно. Під час збереження всіх параметрів можливе коливання температури від 21 до 25 градусів Цельсія. У теплі періоди року температура повітря повинна складати (23 – 25) градусів Цельсія, швидкість руху повітря (0,1 – 0,2) метрів в секунду, вологість (40 – 60) %. Температура може коливатися від 22 до 26 градусів Цельсія під час збереження всіх інших параметрів мікроклімату. Вище зазначені норми цілком відповідають фактичним даним приміщення лабораторії вимірювальної техніки та науково-дослідним відділом.

А.2.2 Розрахунок системи загального рівномірного освітлення з лампами розжарювання для приміщення, в якому використовуються зорові роботи високої точності

Розміри приміщення: довжина ($a=6$ м), ширина ($b=3,5$ м), висота ($H=3,5$ м). Приміщення має світлу побілку: коефіцієнт відбиття $P_{\text{стелі}} = 70$ %, $P_{\text{стін}} = 50$ %. Висота робочих поверхонь (столів) $h_p = 0,7$ м. Для освітлення прийнято світильники типу УПМ-15, що розташовано на стелі, відстань від світильника до стелі $h_c = 0,4$ м. Мінімальна освітленість за нормами $E=200$ лк.

1) Визначається висота підвісу світильників над підлогою:

$$h_0 = H - h_c = 3,5 - 0,4 = 3,1 \text{ м.}$$

Для світильників загального освітлення з лампами розжарювання потужністю до 200 Вт мінімальна висота підвісу над підлогою відповідно до СНІП П-4-79 повинна бути в межах (2,5 – 4,0) м, залежно від характеристики світильника. Освітлення лабораторії вимірювальної техніки та науково-дослідного відділу відповідає цій вимозі.

2) Визначається висота підвісу світильника над робочою поверхнею:

$$h = h_0 - h_p = 3,1 - 0,7 = 2,4 \text{ м.}$$

Рівномірність освітлення досягається під час відповідного співвідношення відстані між світильниками (L) та висоти їх підвісу (h).

3) Визначається рекомендована відстань між світильниками:

$$L = 0,7 \cdot h = 0,7 \cdot 2,4 = 1,68 \text{ м.}$$

4) Розраховується необхідна кількість світильників:

$$N = \frac{a \cdot b}{L^2} = \frac{6 \cdot 3,5}{1,68^2} = 7,4.$$

Приймається 8 світильників, з обліком розмірів приміщення вони розташовуються у два ряди по 4 штуки.

5) Світловий потік лампи світильника ($\Phi_{\text{л}}$) визначається за формулою:

$$\Phi_{\text{л}} = \frac{E \cdot K_3 \cdot S \cdot Z}{N \cdot n \cdot \eta},$$

де E – нормативна освітленість, лк;

K_3 – коефіцієнт запасу, який враховує зниження освітленості в результаті забруднення та старіння ламп;

S – площа приміщення, що освітлюється, м²;

Z – коефіцієнт нерівномірності освітлення для ламп розширювання (1,15);

N – кількість світильників;

n – кількість ламп у світильнику;

η – коефіцієнт використання світового потоку, що визначається за світлотехнічними таблицями залежно від показника приміщення (i) та

коефіцієнтів відбиття стін і стелі.

6) Визначається показник приміщення:

$$i = \frac{a \cdot b}{h \cdot (a + b)} = \frac{6 \cdot 3,5}{3,5 \cdot (6 + 3,5)} = 2,21.$$

Коефіцієнт використання $\eta = 0,48$ для світильника УПМ-15 ($i = 2,5$, $P_{\text{стелі}} = 70\%$, $P_{\text{стін}} = 50\%$)

Світловий потік одного світильника, а значить і лампи, оскільки за конструктивним виконанням у світильнику цього типу встановлена лише одна лампа, дорівнює:

$$\Phi_{\text{л}} = \frac{E \cdot S \cdot Z}{N \cdot n \cdot \eta} = \frac{200 \cdot 21 \cdot 1,15}{6 \cdot 1 \cdot 0,48} = 1677 \text{ лм.}$$

9) обирається лампа Б-150 потужністю 150 Вт, світловий потік якої дорівнює 2000 лм. Хоча це значення на 19,2 % більше розрахованого, проте не перевищує встановлену норму ($-0\% < \Phi_{\text{л}} < +20\%$). Сумарна електрична потужність усіх світильників, встановлених у приміщенні становить:

$$P_{\text{св}} = P \cdot N = 150 \cdot 8 = 1200 \text{ Вт.}$$