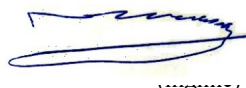


НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ
КАФЕДРА АКУСТИЧНИХ ТА МУЛЬТИМЕДІЙНИХ ЕЛЕКТРОННИХ
СИСТЕМ

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

— Сергій НАЙДА



“ 10 ” 12 2022р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності

171 – «Електроніка»

(код і назва спеціальності)

на тему: Розробка скануючого пристрою для неруйнівного контролю рейок різних типів

Виконав: студент 5 курсу, групи ДГ-11мп

(шифр групи)

Шаповалов Ілля Костянтинович

(прізвище, ім'я, по батькові)



(підпис)

Керівник:

асистент кафедри АМЕС, Ph.D., Паренюк Дмитро Володимирович

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)



(підпис)

Рецензент: Заступник керівника відділу методів неруйнівного контролю

ТОВ «УЛЬТРАКОН-СЕРВІС», к. т. н., Денис ГАЛАНЕНКО

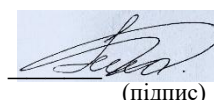
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)



підпис)

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

Студент Шаповалов І.К.



(підпис)

Київ – 2022

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Факультет Електроніки
(повна назва)

Кафедра Акустичних та мультимедійних електронних систем
(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність 171 «Електроніка»
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Сергій НАЙДА

(підпис)

“ 01 ” 09 2022р.

ЗАВДАННЯ
на дипломну роботу студенту
Шаповалову Іллі Костянтиновичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка скануючого пристрою для неруйнівного контролю рейок різних типів

керівник роботи Паренюк Дмитро Володимирович, Ph.D.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від 08.11.2022 р. №4092-с.

2. Термін подання студентом роботи: 07.12.2022/


















3. Вихідні дані до роботи:

літературні джерела інформації будови та характеристик дефектоскопів для вихроструменевого та ультразвукового неруйнівного контролю.

4. Зміст роботи: огляд джерел інформації, аналіз об'єкту контролю, визначення перетворювача, налаштування сканеру.

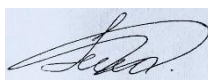
Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів дипломної роботи	Примітка
1.	Огляд літератури	01.04-15.05	
2.	Написання вступу	02.06-12.06	
3.	Підготовка до написання 1-го розділу	13.06–20.06	

4.	Аналіз методів неруйнівного контролю	20.06–23.06	
5.	Оформлення 1-го розділу	24.06–01.07	
6.	Підготовка до написання 2-го розділу	01.07–05.07	
7.	Огляд об'єкту контролю	06.07-15.07	
8.	Оформлення 2-го розділу	15.07-19.07	
9.	Підготовка до написання 3-го розділу	20.07-01.08	
10.	Аналіз практичних можливостей використання неруйнівних методів контролю	01.08-10.08	
11.	Огляд зон контролю	10.08-01.09	
12.	Оформлення 3-го розділу	02.09-03.09	
13.	Підготовка до написання 4-го розділу	04.09-15.09	
14.	Вибір будови скануючого пристрою	16.09-25.09	
15.	Розрахунки для скануючого колеса	26.09-10.10	
16.	Розрахунки для вдосконалення контролю	11.10-01.11	
17.	Оформлення 4-го розділу та загальних висновків магістерської роботи	02.11-23.11	
18.	Оформлення всієї роботи та презентації	24.11-10.12	
19.	Підготовка до захисту	11.12-19.12	
20.	Захист магістерської дисертації	20.12-31.12	

ТЕМИ МД та наукові керівники затвердженні НАКАЗОМ по КПІ: НАКАЗ №4092-с від 08.11.2022р.

Студент



(підпис)

Шаповалов І.К.

Керівник роботи



(підпис)

Паренюк Д.В.

Шаповалов, І. К. Розробка скануючого пристрою для неруйнівного контролю рейок різних типів: магістерська дис.: 171 Електроніка / Шаповалов Ілля Константинович. – Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 112 с.

Магістерська дисертація: загальний обсяг 112 с., основна частина 110 с., додатки 2 с., 13 табл., 58 рис., 45 джерел.

У наш час наша країна захищає право бути незалежною та демократичною європейською державою від країни-терориста, яка за будь яку ціну хоче не дати цьому статися. Наша армія цілодобово та без вихідних боронить наш дім. У цьому нам сильно допомагає цивілізований світ постачаючи зброю, набої, генератори, а також багато гуманітарної допомоги. Через відсутнє авіасполучення з міркувань безпеки велика частина транспортування покладена на залізницю. Кожного дня потяги курсують по всій країні без зупину, що досить сильно виснажує залізничне сполучення. Зараз будь яка затримка через поломку колії може дуже сильно нашкодити, саме тому постає питання контролю стану колій.

Одним з таких способів контролю є неруйнівний контроль колії, що дозволяє уникати демонтажні роботи та економити час і фінансування. Найчастіше використовуються ультразвуковий метод контролю (УЗК) та вихрострумний (ВСК) метод контролю.

За допомогою ультразвукового методу можна виконувати контроль частини колії усередині на наявність підповерхневих дефектів. У свою чергу вихрострумний метод дозволяє контролювати поверхню колії на наявність несутільностей.

Комбінований метод, який використовує обидва УЗ та ВТ методи, дозволяє проводити контроль об'єкту у зонах всередині і одночасно на поверхні, що робить цей метод результативним та виграє час у порівнянні з іншими методами.

Мета магістерської дисертації - розробка скануючого пристрою для неруйнівного контролю колії, у якій можливе використання різних типів рейок.

Визначення можливості використання для контролю рейки комбінованого методу, який дозволить поєднати два методи неруйнівного контролю і за допомогою якого буде можливість виявляти усі імовірні дефекти на зовні і всередині головки рейки, якщо вони перекривають достатню площу ультразвукового променя та незалежно від їх орієнтації відносно локації акустичного сканеру. Підбір датчиків для ультразвукового контролю із відповідними кутами входження ультразвукових променів у об'єкт контролю, їх місця розміщення та можливої будови скануючого приладу.

Досягнення цієї мети передбачає **розв'язання таких задач:**

1. Визначення особливостей одночасного використання різних за фізичною природою методів неруйнівного контролю рейки.
2. Вдосконалення теорії неруйнівного контролю рейок.
3. Експериментальна перевірка можливостей використання методів неруйнівного контролю при нестандартному встановленні датчиків.
4. Експериментальна можливість використання нового діагностуючого параметру для проведення неруйнівного контролю рейок – ширини головки рейки.
5. Встановлення можливості використання типових перетворювачів неруйнівного контролю для контролю різних об'єктів контролю, котрі відрізняються хімічним складом.
6. Розробка та розрахунок параметрів роботи нового типу скануючого пристрою для ультразвукового неруйнівного контролю.

Об'єктом дослідження є процес перетворення енергії коливань п'єзопластини під час проходження ними шляху через скануючий пристрій у об'єкт контролю та у зворотному напрямі, трансформація енергії електромагнітних коливань у металі.

Предметом дослідження є акустичний та вихрострумівий тракти приладу неруйнівного контролю, котрі працюють у визначеному діапазоні частот та використовують у якості об'єкту контролю рейки різних типів.

Методи дослідження. Дослідження проведено використовуючи два методи неруйнівного контролю: ультразвуковий та вихрострумний. Ультразвуковий метод використовується для контролю підповерхневих та глибинних дефектів, вихрострумний для знаходження поверхневих несучільностей об'єкту контролю. Використання тесту Шапіро-Уїлка та графічний методу для аналізу відповідності нормальному розподілу у вибірці отриманих результатів; t -критерій Стюдента вибірок із нормальним законом розподілу результатів.

Практичне значення одержаних результатів. Отримані під час виконання дисертації результати ожуть бути використані:

- для покращення якості та продуктивності контролю лінійних ділянок залізничної колії, що зменшить час та фінансові витрати на її діагностику;
- для забезпечення збереження цілісності використовуваного матеріального забезпечення при проведенні контролю пошкоджених рейок;
- при підготовці фахівців на кафедрі Акустичних та мультимедійних електронних систем, а саме, при проведенні лабораторних та практичних робіт з дисциплін "Акустичні прилади та системи", "Прилади та системи неруйнівного контролю".

Публікації:

[1] Д. В. Паренюк, І. К. Шаповалов, К. С. Дрозденко, і В. П. Міщенко, «Аналіз можливості використання пристрою для контролю стану рейки із нестандартним встановленням сканеру», *Мікросистеми, Електроніка та Акустика*, vol 27, no 2, p 8, 2022, [doi: https://doi.org/10.20535/2523-4455.me.263459](https://doi.org/10.20535/2523-4455.me.263459).

[2] Д. В. Паренюк і І. К. Шаповалов, «ОГЛЯД ЗОН КОНТРОЛЮ РЕЙКИ ПРИ НЕСТАНДАРТНОМУ ВСТАНОВЛЕННІ СКАНЕРУ», в *Proceedings of the 14th International scientific and practical conference*, 2022, pp 151–155, [Online]. Available at: <https://sci-conf.com.ua/xiv-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-modern-directions-of-scientific-research-development-13-15-07-2022-chikago-ssha-arhiv/>.

Ключові слова: неруйнівний контроль; ехо-імпульсний; вихреструмний метод контролю; дзеркально-тіньовий; головка рейки; рейка; статистичний аналіз; скануючий пристрій; іммерсійне колесо.

Shapovalov, I. K. Development of a scanning device for non-destructive control of different types of rails: master's thesis: 171 Electronics / Shapovalov Ilya. – Kyiv, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2022. – 112 p.

Master's thesis: total volume 112 p., main part 110 p., appendices on 2 pages, 13 tables, 58 figures, 45 sources.

Nowadays, our country defends the right to be an independent and democratic European state against a terrorist country that wants to prevent this from happening at any cost. Our army defends our home 24/7. The civilized world helps us a lot in this by supplying weapons, ammunition, generators, as well as a lot of humanitarian aid.

Due to the lack of air traffic for security reasons, most of the transportation is carried out by rail. Every day, trains run all over the country without stopping, which exhausts the railway connection quite a lot. Now, any delay due to a broken track can be very damaging, which is why the issue of monitoring the condition of the tracks arises.

One of these methods of control is non-destructive control of the track, which allows you to avoid dismantling work and save time and money. The ultrasonic method (US) and the eddy current (EC) method are most often used.

With the help of the ultrasonic method, it is possible to control a part of the track inside for the presence of subsurface defects. In turn, the eddy current method allows you to control the surface of the track for the presence of discontinuities.

The combined method, which uses both US and EC methods, allows you to control the object in areas everywhere and at the same time on the surface, which makes this method effective and saves time compared to other methods.

The goal of the master's thesis is the development of a scanning device for non-destructive testing of the track, which is capable of being used with different types of rails. Determination of the possibility of using a combined method to control the rail, which will allow combining two methods of non-destructive testing and with which it will be possible to detect all possible defects on the outside and inside of the

rail head, if they cover a sufficient area of the ultrasonic beam and regardless of their orientation relative to the location of the acoustic scanner. Selection of sensors for ultrasonic control with corresponding angles of entry of ultrasonic rays into the object of control, their location on the rail and possible layout of the scanning device.

Achieving this goal involves **solving the following problems:**

1. Determination of the features of the simultaneous use of different physical methods of non-destructive rail control.
2. Improvement of the theory of non-destructive control of rails.
3. Experimental verification of the possibilities of using non-destructive testing methods for non-standard installation of sensors.
4. Experimental possibility of using a new diagnostic parameter for non-destructive control of rails - the width of the rail head.
5. Establishing the possibility of using typical transducers of non-destructive testing for monitoring various control objects that differ in chemical composition.
6. Development and calculation of operating parameters of a new type of scanning device for ultrasonic non-destructive testing.

The object of the research is the process of transformation of the vibration energy of the piezo plate during its passage through the scanning device to the object of control and in the opposite direction, transformation of the energy of electromagnetic vibrations in the metal.

The subject of the research is acoustic and eddy current tracts of the non-destructive testing device, which work in a pre-set frequency range and apply different types of rails as an object of control.

Research methods. The research was carried via usage of two methods of non-destructive testing: ultrasonic and eddy current. The ultrasonic method is used to detect subsurface and deep defects, and the eddy current method is used to find surface discontinuities of the control object. Using the Shapiro-Wilk test and the graphic

method was analyzed the conformity to the normal distribution in the sample of the obtained results; Student's t-test of samples with a normal distribution of results.

Practical significance of the obtained results. The results obtained during the dissertation will be used:

- to improve the quality and productivity of control of linear sections of the railway track, which will reduce time and financial costs for its diagnosis;
- to ensure the preservation of the integrity of the material base used during inspection of the damaged rails;
- during the training of specialists at the Department of Acoustic and Multimedia Electronic Systems, namely, when conducting laboratory and practical work in the disciplines "Acoustic devices and systems", "Non-destructive testing devices and systems".

Publications:

[1] D. V. Pareniuk, I. K. Shapovalov, K. S. Drozdenko, and V. P. Mishchenko, "Analysis of Application the Device with Nonstandard Scanner Installation for Rail Condition Monitoring", *Microsystems, Electronics and Acoustics*, vol 27, no. 2, p. 8, 2022, doi: <https://doi.org/10.20535/2523-4455.mea.263459>.

[2] D. V. Pareniuk and I. K. Shapovalov, "OVERVIEW OF RAIL CONTROL ZONES AT NON-STANDARD INSTALLATION OF THE SCANNER", in *Proceedings of the 14th International scientific and practical conference, 2022*, pp 151–155, [Online]. Available at: <https://sci-conf.com.ua/xiv-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-modern-directions-of-scientific-research-development-13-15-07-2022-chikago-ssha-arhiv/>.

Keywords: non-destructive testing; echo-impulse; eddy current control method; mirror-shadow; rail head; rail; statistical analysis; scanning device; immersion wheel.

ЗМІСТ

ЗМІСТ	11
Розділ 1.....	15
ВИДИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ.....	15
1.1. Постановка проблеми.....	15
1.2. Візуальний огляд.....	16
1.3. Акустичні методи контролю.....	17
1.3.1. Параметри пружних хвиль.....	21
1.3.2. Характеристики акустичного поля.....	22
1.3.3. Властивості акустичних хвиль.....	23
1.3.4. Типи акустичних хвиль.....	25
1.3.5. Типи п'єзоелектричних перетворювачів.....	27
1.3.6. Методи ультразвукової дефектоскопії.....	28
1.4. Вихреструмний метод контролю.....	32
1.5. Висновки до розділу I.....	39
Розділ 2.....	40
ОГЛЯД ОБ'ЄКТУ КОНТРОЛЮ – РЕЙОК ЗАЛІЗНИЧНИХ.....	40
2.1. Аналіз об'єкту контролю.....	40
2.2. Аналіз будови, хімічного складу та фізичних характеристик рейок широкої колії.....	41
2.3. Аналіз будови, хімічного складу та фізичних характеристик рейок кранового господарства.....	44
2.4. Порівняльний аналіз рейок широкої колії та кранового господарства.....	46
2.5. Висновок до розділу II.....	50
Розділ 3.....	51

Огляд можливостей практичного застосування неруйнівного контролю рейок	51
3.1. Аналіз навантажувальних впливів на рейку. Проблемні види пошкоджень рейки	51
3.2. Типові зони контролю рейки	54
3.2.1. Тандемна процедура ультразвукового та вихреструмового контролю рейки, прийнята у західних країнах	55
3.2.2. Тандемна процедура ультразвукового контролю рейки, реалізована українським виробником	57
3.3. Оновлені зони контролю рейки	60
3.3.1. Зона контролю візуальним методом	60
3.3.2. Зона контролю ультразвуковим методом	61
3.3.3. Зона контролю вихреструмовим методом	62
3.4. Експериментальна перевірка можливості контролю оновлених зон контролю рейки (при нетиповому встановленні датчику)	63
3.4.1. Проведення експериментів	67
3.4.2.	69
3.5. Ультразвуковий контроль на великих швидкостях	75
3.6. Висновок до розділу III	76
Розділ 4	78
Вибір будови скануючого пристрою	78
4.1. Розгляд можливості реалізації скануючого пристрою	78
4.2. Розрахунок скануючого колеса	81
4.2.1.	81
4.2.2.	94
4.2.3.	96
4.3. Розрахунок типового сканера	98

4.4. Розрахунок глибини залягання вихрових струмів для залізничних рейок	100
4.5. Висновок до розділу IV.....	102
Загальні висновки.....	104
Список використаних джерел:	106
ДОДАТОК А.....	111

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ

УЗК – ультразвуковий контроль

ВСК – вихреструмний метод контролю

НК – неруйнівний контроль

ОК – об'єкт контролю

УЗ – ультразвук

ВСП – вихреструмний перетворювач

ВСЗ – вихреструмні зонди

ПЕП – п'єзоелектричні перетворювачі

Розділ 1

ВИДИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

1.1. Постановка проблеми

Потяги є одним із найшвидших та найпотужніших засобів транспортування та пересування по суші, який відіграє значну роль у сталому економічному розвитку сучасного світу. Для використання вказаного транспорту потрібно забезпечити безперебійне та надійне пересування потягів по якісно вкладеним та надійним коліям. Залізничні колії необхідні для руху поїздів, і складаються з рейок, опор, шпал і дорожнього полотна для розподілу навантаження поїзда. Рейки постійно підлягають дії пошкоджуючих факторів – тертя об колеса потягів, дій ваги потягів та погодних факторів. Ці фактори суттєво впливають на максимально можливий термін експлуатації як рейкового, так і рухомого складу.

Під час проведення контролю стану рейкового господарства застосовуються три основних методи – візуальний огляд, використання ультразвуку та вихрових струмів.

Саме використання сукупного результату двох основних методів неруйнівного контролю – ультразвукового та вихреструмового дасть найбільш повну картину наявного стану об'єкту контролю. Також необхідно шукати нові методи використання наявних методик і засобів проведення сканування рейкового господарства для підвищення його якості.

1.2. Візуальний огляд

Візуальний огляд є найбільш простим та доступним і застосовується, як правило, до використання інших методів. При методиці проведення контролю рейок, що наразі використовується, використання оператором даного методу ускладнено через те, що поле його огляду обмежується візком дефектоскопу та необхідністю витримувати встановлену швидкість контролю. Це вимагає або залучення до проведення візуального огляду додаткового персоналу, або проведення лише поверхневого огляду.

1.3. Акустичні методи контролю

Акустичні методи неруйнівного контролю базуються на реєстрації та дослідженні параметрів пружних коливань, що поширюються у об'єкті контролю. Ця група методів може застосовуватись при контролі усіх матеріалів, що проводять акустичні хвилі.

Із цієї групи найбільшого поширення набули методи, що застосовують ультразвук[1]. Застосування ультразвуку дозволяє виявляти неоднорідності структури, внутрішні дефекти та ін. Використання ультразвуку полягає у застосуванні властивостей середовища та акустичних коливань.

У рамках досліджуваної проблеми найбільший інтерес представляють імерсійні та контактні перетворювачі. Контактні перетворювачі працюють у щільному контакті із об'єктом контролю. Імерсійні перетворювачі вимагають наявності товстого шару рідини між об'єктом контролю і датчиком.

Акустичні коливання – це механічні коливання (у нашому випадкові – металу рельсу) широкого частотного діапазону (50 Гц – 50 МГц) навколо свого положення. Акустичні хвилі – переміщення у вказаному середовищі механічної деформації. Найбільш широкоживаним у контролі рейок є перетворювач частотою 2,5 МГц[2].

Коливання – це процес зміни стану системи відносно точки рівноваги, що у тій чи іншій мірі повторюється в часі. За своєю фізичною природою коливання діляться на: електромагнітні та механічні. Механічні коливання – це механічні рухи тіла або системи тіл. У механіці системою тіл (або просто системою) називають групу тіл, рух яких вивчають. Сили, що діють між тілами системи, називаються внутрішніми. Зовнішніми силами називають сили, які діють на тіла системи з боку тіл, що не входять у неї. Коливання майже завжди пов'язані з перетворенням енергії однієї форми прояву в іншу форму. Наприклад, в механічних і акустичних коливаннях – це перетворення кінетичної енергії у потенціальну і навпаки.

Коливання, які здійснює система після того, як вона якимось чином виведена зі стану стійкої рівноваги і потім надана самій собі, називаються вільними. Такі коливання виникають під дією внутрішніх сил, що прагнуть повернути систему в положення рівноваги, а їх частота залежить від властивостей системи та оточуючого середовища. Вільні коливання є загасаючими; їх амплітуда безперервно зменшується (Рис. 1.1) внаслідок втрат енергії через опір середовища, в якому відбувається коливальний рух, та інших втрат (наприклад, тертя)[3].

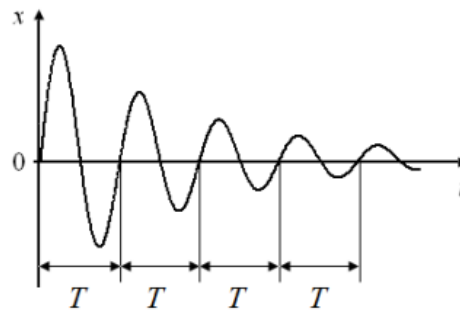


Рис. 1.1 Загасаючі гармонічні коливання (T -період коливань)

Якщо система здійснює коливання під впливом зовнішніх сил, що змінюються періодично, то такі коливання називаються вимушеними. Періодична сила, що викликає механічні коливання, називається силою збурення. Частота вимушених механічних коливань визначається виключно частотою сили збурення і не залежить від розмірів і властивостей тіла, що коливається. Розповсюджуються коливання у тому середовищі, де були створені у напрямі від джерела сили збурення (Рис. 1.2)

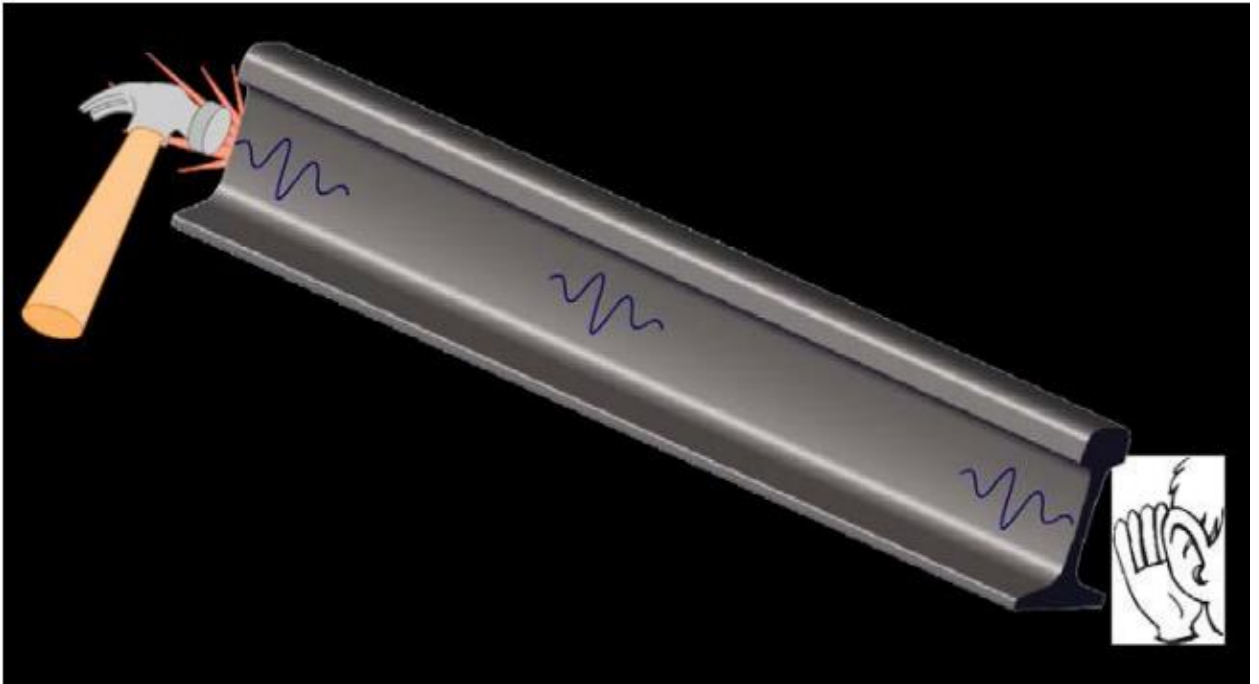


Рис. 1.2 Розповсюдження акустичних коливань

Коливальні процеси можуть бути періодичними і неперіодичними. Періодичними називаються такі коливання, для яких кожне значення певної величини повторюється через однакові проміжки часу.

Кількість повних коливань, що відбуваються за одиницю часу, називається частотою коливань, яка пов'язана з періодом наступною залежністю.

Гармонійні коливання – це така періодична в часі зміна величини, яка може бути описана гармонійним законом (1.1):

$$x = A \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_0) \quad (1.1)$$

де A – амплітуда гармонійного коливання (додатна величина), $(\omega t + \varphi_0)$ – фаза гармонійного коливання, φ_0 – початкова фаза (в момент часу $t = 0$), ω – циклічна (або кругова) частота (1.2):

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad (1.2)$$

Пружна хвиля – це механічні збурення (деформації), що поширюються в середовищі, яке має властивість пружності. При цьому кожна частинка

середовища, що бере участь у хвильовому русі, коливається біля положення своєї рівноваги, передаючи свою енергію сусіднім частинкам.

Пружне середовище – це таке середовище, будь-який виділений об'єм якого має властивість пружності. Пружністю називається властивість тіл або виділених об'ємів середовища відновлювати свою форму після припинення дії сил, що викликають деформацію[3].

Ультразвукова (УЗ) дефектоскопія для знаходження дефектів використовує пружні коливання і хвилі. Акустичні коливання – це механічні коливання пружної середи (металева рейка) навколо свого положення рівноваги, а акустичні хвилі – розповсюдження в цій середі механічної деформації[4].

На Рис. 1.3 наведена класифікація пружних хвиль в залежності від діапазону частот. В неруйнівному контролі найчастіше використовуються ультразвукові хвилі, що являють собою процес поширення в середовищі пружних коливань (коливань пружного середовища) у діапазоні частот від 20 кГц до 1 ГГц. В деяких методах неруйнівного контролю (наприклад, метод вільних коливань, шумодіагностика тощо) використовується звуковий діапазон частот від 20 Гц до 20 кГц (цей діапазон відповідає спектру чутності людського вуха). Інфразвуковий та гіперзвуковий діапазони частот не знайшли практичного застосування в неруйнівному контролі.

Розподіл пружних хвиль за частотою [2]:

- інфразвук – частота до 20 Гц (коливань в секунду);
- звук – від 20 до 20 кГц;
- ультразвук – від 20 кГц до 1 ГГц;
- гіперзвук – більше 1 ГГц.



Рис. 1.3 Представлення пружних хвиль на частотній осі

1.3.1. Параметри пружних хвиль

Основними параметрами, що характеризують пружну хвилю є: частота f , період T , амплітуда A , швидкість поширення C , довжина хвилі λ та фаза φ .

Довжина хвилі λ . Відстань, взята вздовж променя, між двома точками, які коливаються в одній фазі (Рис. 1.4). Оскільки усі частинки хвилі виконують коливальний рух, то коливання частинок можна характеризувати періодом[5].

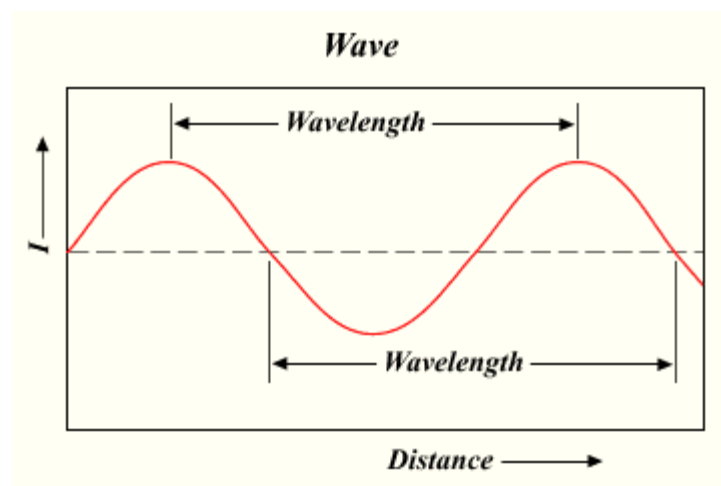


Рис. 1.4 Довжина хвилі

Період коливань T (1.3). Час, за який довільна частинка хвилі здійснить одне повне коливання.

$$T=1/f \quad (1.3)$$

Фаза хвилі φ . Параметр, що показує, яка частина періоду пройшла з моменту початку останнього циклу коливань.

Частота f . Кількість коливань, які здійснить частинка хвилі за одиницю часу.

Амплітуда A . Максимальне зміщення тіла, що коливається, від положення рівноваги.

Швидкість поширення C . Швидкість розповсюдження хвилі визначається як шлях який проходить хвиля за одиницю часу (секунду). Швидкість об'ємних хвиль (поздовжньої, поперечної, поверхневої) залежить тільки від пружності і щільності середовища та типу хвилі.

1.3.2. Характеристики акустичного поля

Акустичне поле – це простір, у межах якого поширюється акустична (пружна) хвиля. Фізичними величинами, що характеризують акустичне поле, є: акустичний тиск P , коливальна швидкість частинок середовища v , густина середовища ρ та температура T .

Відношення акустичного тиску до відповідної йому коливальної швидкості визначає питомий акустичний імпеданс (питомий хвильовий опір(1.4)):

$$z_{\Pi} = \frac{P}{v} \quad (1.4)$$

У загальному випадку це комплексна величина, що залежить від фазового зсуву між тиском та коливальною швидкістю, який в свою чергу залежить від просторових координат, характеру хвильового поля та умов поширення хвилі.

Для плоскої хвилі, що біжить, тиск та коливальна швидкість синфазні, а отже, питомий акустичний імпеданс не залежить ні від часу, ні від координати та є дійсною величиною. У такому випадку використовують поняття акустичний імпеданс (хвильовий опір), який залежить тільки від властивостей середовища (1.5):

$$z = \rho C \quad (1.5)$$

де ρ – середня густина середовища, в якій поширюється акустична хвиля, C – швидкість поширення хвилі.

Для ідеальної (без втрат енергії) плоскої хвилі питомий акустичний імпеданс рівний акустичному імпедансу $z_{\Pi} = z$ [3].

1.3.3. Властивості акустичних хвиль

Віддзеркалення – фізичний процес взаємодії хвиль з поверхнею, внаслідок якого змінюється напрямок хвильового фронту на межі двох середовищ з різними властивостями, причому хвильовий фронт повертається в середовище, з якого він прийшов. Одночасно з віддзеркаленням хвиль на межі поділу середовищ, як правило, відбувається заломлення хвиль, якщо хвиля падає під кутом до поверхні (за винятком випадків повного внутрішнього віддзеркалення).

Заломлення також пов'язане зі зміною напрямку хвильового фронту, але при заломленні розглядається хвиля, що пройшла в друге середовище. Заломлення спостерігається, коли фазові швидкості акустичних хвиль у контактуючих середовищах відрізняються.

Якщо під дією збурень, які виникають під час проходження лінійних хвиль, властивості середовища не змінюються, то у такому випадку хвилі підкоряються принципу суперпозиції (додавання), який полягає в наступному: під час поширення у середовищі декількох хвиль, кожна хвиля поширюється так, немов більше хвиль немає, а кінцеве зміщення частинки середовища дорівнює геометричній сумі зміщень частинок[3].

В результаті суперпозиції хвиль виникає явище інтерференції, яке полягає у взаємному збільшенні або зменшенні результуючої амплітуди двох або декількох хвиль при їх накладенні одна на одну. Інтерферувати можуть всі хвилі, проте стійка (стаціонарна) інтерференційна картина буде спостерігатися

тільки для когерентних хвиль, які мають однакові частоти, постійну різницю фаз і коливання яких відбуваються в одній площині.

Дифракція (лат. diffractus – буквально розламаний, переламаний) акустичних хвиль – явище, яке проявляє себе, як відхилення від законів геометричної акустики під час поширення хвиль (тобто, відхилення від законів прямолінійного поширення). У вузькому сенсі дифракція – це огинання хвилями перешкод і їх проникнення в область геометричної тіні.

Явище дифракції пояснюється за допомогою принципу Гюйгенса-Френеля. Християн Гюйгенс в 1678 р. увів наступний постулат: кожна точка, котрої досягла хвиля, стає генератором вторинних хвиль, обвідна яких визначає положення хвильового фронту у середовищі в наступний момент часу (Рис. 1.5).

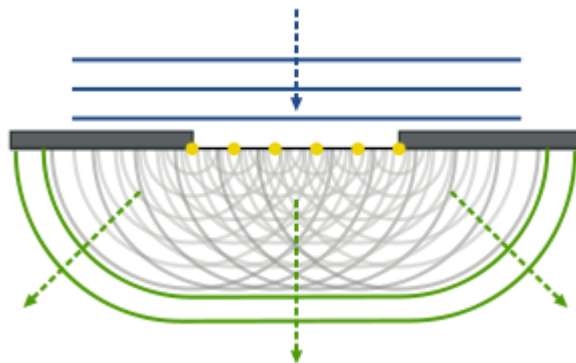


Рис. 1.5 Візуалізація принципу Гюйгенса-Френеля

Кожен елемент хвильового фронту можна розглядати як центр вторинного збурення, який породжує вторинні сферичні хвилі, а акустичне поле в кожній точці простору буде визначатися інтерференцією цих хвиль. При цьому всі вторинні джерела, що розміщені на поверхні фронту, когерентні між собою.

Поширення УЗ хвиль у газах та рідинах супроводжується рухом середовища в напрямі поширення хвиль. Такий рух називають акустичною

течією, швидкість якої залежить від в'язкості середовища, інтенсивності УЗ та його частоти[6].

1.3.4. Типи акустичних хвиль

Поздовжня хвиля — це хвиля, у якій коливання в кожній точці простору паралельні напрямку розповсюдження (Рис. 1.6)[3]. Хвиля з перпендикулярними коливаннями у напрямку поширення, називається поперечною.

Вектор напруженості у поздовжній хвилі направлений завжди у напрямку паралельному розповсюдженню. Наприклад звукова хвиля в газі[7]. Такий тип хвилі може розповсюджуватись у всіх тілах окрім вакуума. Швидкість розповсюдження у сталі $C_1=5950$ м/с[8].

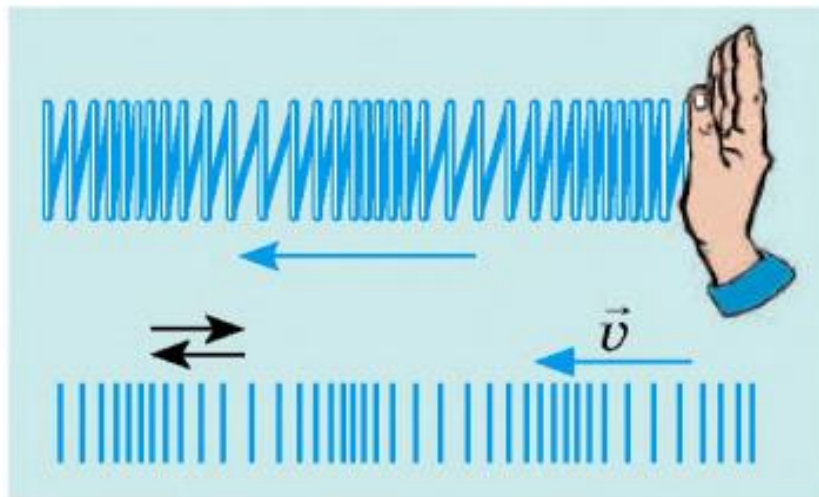


Рис. 1.6 Поздовжня хвиля

Поперечна хвиля— хвиля з коливаннями в площині, перпендикулярній до напрямку поширення (Рис. 1.7). Коли хвиля має коливання паралельні напрямку руху, то така хвиля називається поздовжньою.

Поперечні хвилі мають дві поляризації через те, що в площині є два незалежні напрямки руху[6]. Цей тип хвиль може розповсюджуватись лише в твердих тілах. В рідинах та газах поперечні хвилі не розповсюджуються так як в них відсутня упругість форми. Швидкість поперечної хвилі (C_t) у матеріалі завжди менше швидкості поздовжніх хвиль (C_l). Для сталі відношення:

$$C_t \approx 0,55 \cdot C_l$$

Найбільш широко використовують поздовжні та поперечні хвилі для неруйнівного контролю матеріалів. Ці хвилі найкраще виявляють дефекти при нормальному падінні на об'єкт контролю.

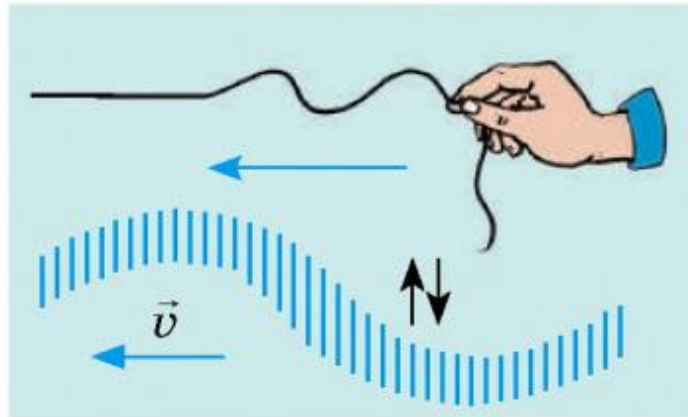


Рис. 1.7 Поперечна хвиля

Поверхневі хвилі (хвилі Релея) – хвилі, які розповсюджуються вздовж поверхні твердого тіла (Рис. 1.8), у шарі з характерною товщиною від 1,5 до 2 довжин хвилі $(1,5-2) \cdot \lambda$. Коливання частинок середовища хвилі поєднують у собі поздовжні та поперечні коливання, при цьому частки рухаються замкнутими еліптичними траєкторіями швидкість (C_n) , найнижча, у сталях наближено виконується співвідношення: $C_n \approx 0,96 \cdot C_t$.

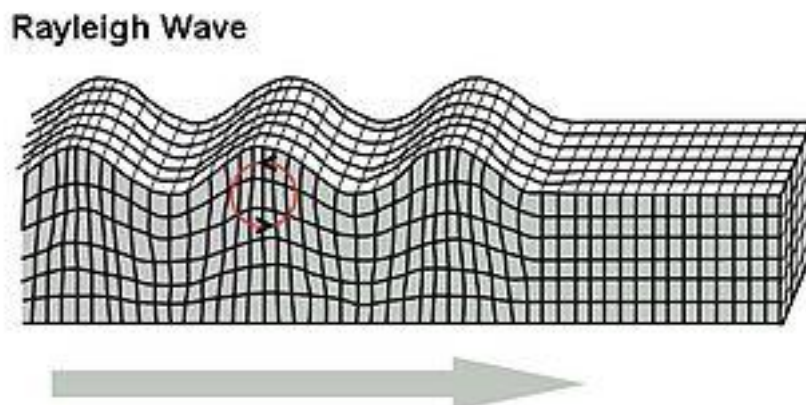


Рис. 1.8 Поверхнева хвиля (хвиля Релея)

Поверхневу хвилю успішно застосовують для виявлення дефектів поблизу поверхні виробу. Вона реагує на дефекти залежно від глибини їхнього залягання. Дефекти, розташовані на поверхні, дають максимальне відбиття, а на глибині більше довжини хвилі практично не виявляються.

1.3.5. Типи п'єзоелектричних перетворювачів

Для збудження і прийому ультразвукових коливань використовують п'єзоелектричні перетворювачі.

У технічній літературі і нормативно-технічній документації п'єзоелектричні перетворювачі можуть позначатися аббревіатурою ПЕП. В даний час використовують п'єзоелектричні перетворювачі трьох видів:

- Суміщені (Рис. 1.9) — складаються з одного п'єзоелемента, який в один момент часу виконує роль джерела, а в наступний момент часу — роль приймача ультразвуку;

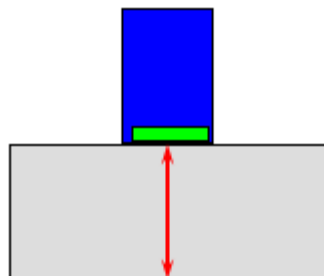


Рис. 1.9 Суміщений перетворювач

- Роздільно-суміщені (Рис. 1.10) — мають в собі два п'єзоелементи (один — збудювач, а другий — приймач), розташованих в одному корпусі і розділених захисним акустичним екраном;

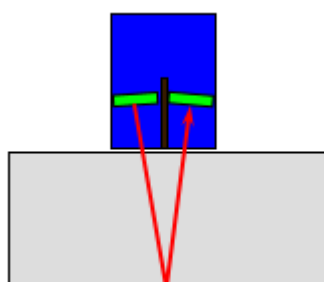


Рис. 1.10 Роздільно-суміщений перетворювач

- Роздільні (Рис. 1.11) — один п'єзоелемент який виконує роль тільки випромінювача або тільки приймача ультразвуку.

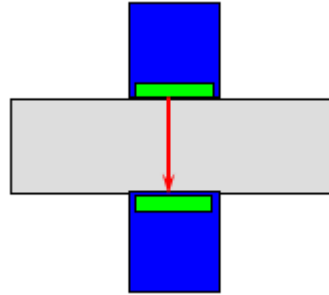


Рис. 1.11 Роздільний перетворювач

Для виготовлення перетворювачів рейкових дефектоскопів найчастіше використовують п'єзоелементи у вигляді пластини, виготовлені з монокристалів цирконату — титанату свинцю марки ЦТС-19 або ЦТС-22. На плоскі поверхні п'єзоелементів наносять тонкі шари срібла, що служать електродами і проводять електричний струм.

Таким чином, виявляється можливим за допомогою п'єзоелемента перетворити електричні коливання в ультразвукові (зворотний п'єзоэффект) і, навпаки, ультразвукові коливання в електричні (прямий п'єзоэффект) [9].

1.3.6. Методи ультразвукової дефектоскопії

Ехо-метод

Високоякісний генератор виробляє короткочасні імпульси (або з високочастотним наповненням – радіоімпульси, або просто короткі імпульси). Посланий випромінювачем імпульс, відбившись, повертається назад до перетворювача (Рис. 1.12), який працює в цей час на прийом[8].

Переваги методу:

- односторонній доступ до об'єкту контролю;
- відносно велика чутливість до внутрішніх дефектів;
- велика точність визначення координат дефектів.

Недоліки методу:

- великий вплив поверхневих завад;

- різка залежність амплітуди ехо-сигналу від орієнтації дефекту;
- неможливість контролювати якісний контакт датчика з поверхнею контролю через відсутність будь-якого сигналу на виході.

Не дивлячись на недоліки, ехо-метод є найбільш використовуваним методом для УЗ дефектоскопії рейок. За допомогою нього знаходяться більше 90% дефектів залізничних колій[10].

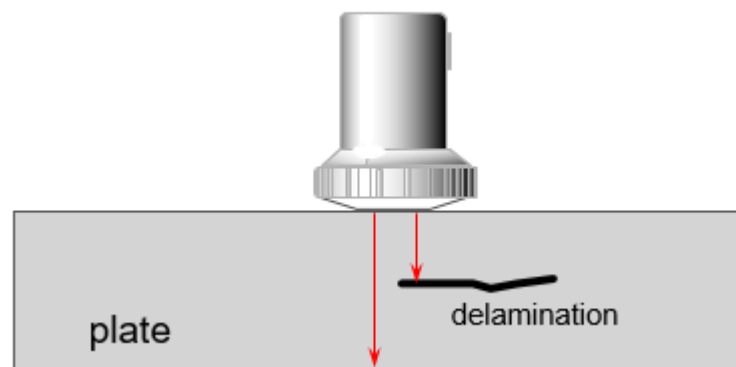


Рис. 1.12 Ехо-імпульсний метод

Тіньовий метод

При проходженні через дефект ультразвук залишає тінь дефекту, так працює тіньовий метод (Рис. 1.13).

При тіньовому методі використовують два перетворювачі. Один із них випромінює ультразвукові коливання, а інший приймає їх. Зменшення інтенсивності коливань залежить від величини дефекту. Чим більше дефект, тим більше послаблюється звуковий потік.

Тіньовий метод малочутливий. Дефект можна виявити, якщо викликана ним зміна сигналу становить 15-20%. Дрібніші дефекти не виявляються.

Істотний недолік тіньового методу - неможливість визначити глибину залягання дефекту. Крім того, при контролі важко визначити зміни сигналу за рахунок дефекту від зміни сигналу з допомогою зміни товщини деталі. Так як тіньовий метод не залежить від роздільної здатності випромінювача, він знайшов широке застосування при дефектоскопії тонких деталей (сталевих листів, автомобільних покрішок та ін.)[8].

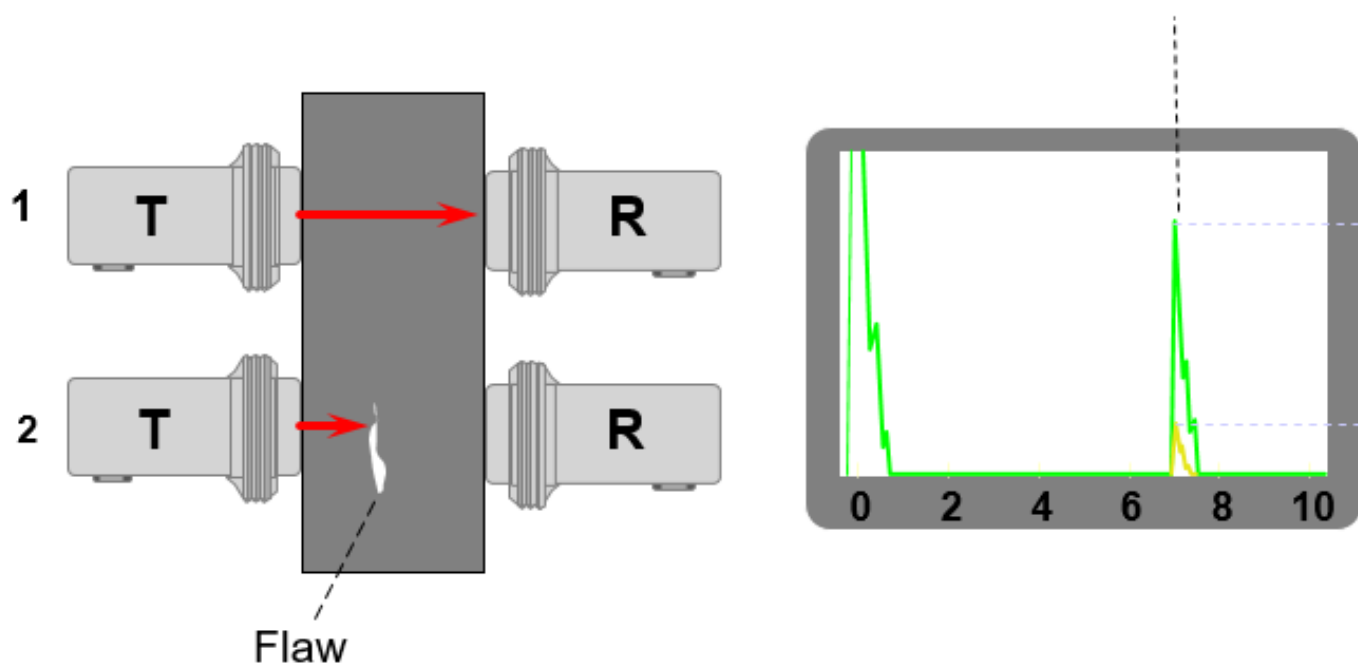


Рис. 1.13 Тіньовий метод

Ехо-дзеркальний метод

Використовується для виявлення дефектів, орієнтованих вертикально до поверхні виробу.

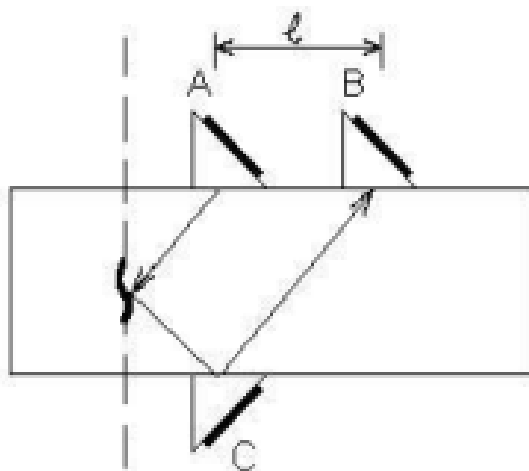


Рис. 1.14. Ехо-дзеркальний метод

Звичайним методом такий дефект не виявляється через дуже малу площу його перерізу. Для виявлення таких дефектів похилі датчики А та В розташовуються на деякій відстані L з одного боку виробу, або другий теж похилый датчик С розташовується з протилежного боку. Відстань L визначається товщиною виробу та кутом введення УЗ у виріб. Так як площа

дефекту в перерізі, перпендикулярному похилому променю, що вводиться, значно перевищує площу нормального до поверхні перерізу дефекту, то підвищується ймовірність виявлення та чутливість контролю[8].

1.4. Вихреструмний метод контролю

Зі швидким розвитком сучасних галузей промисловості, таких як аерокосмічна та атомна енергетика за останні 50 років, вихреструмний метод контролю перетворився на дуже популярний вид лише відносно недавно.

Основи для технології вихрових струмів були зрозумілими набагато раніше, починаючи з прогресу в електриці, який створили Ганс Ерстед і Майкл Фарадей на початку 19 століття.

Ерстед, помітивши, що стрілка компаса заворушилася коли струм проходив через сусідній дріт, припустив, що електричний струм, що протікає по провіднику, породжує а магнітне поле навколо цього провідника[11].

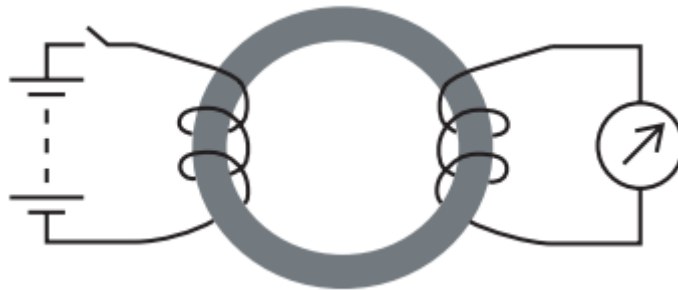


Рис. 1.15 Залізне кільце та дві котушки

Згодом Фарадей показав, що змінюється магнітне поле, зв'язок через кільце з м'якого заліза, генерує струм в іншій котушці, намотаній на кільце (1.15). Пізніше Максвелл виразив це у своїх рівняннях про поведінку електромагнітного поля, яке утворює основи технології вихрових струмів сьогодні.

Вихреструмні методи контролю базуються на використанні принципу електромагнітної індукції, що реєструється сканером, що являє собою котушку або систему котушок. Загальний принцип роботи наведено на[12].

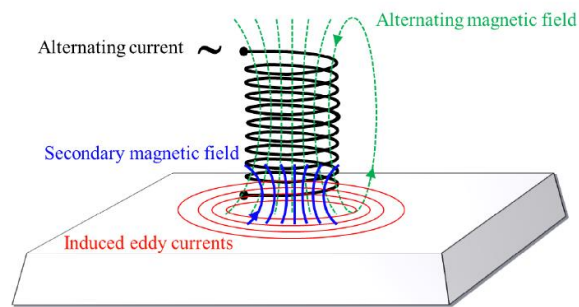


Рис. 1.16 Принцип реєстрації вихроструму

Загалом принцип реєстрації сигналу від об'єкту наступний – під дією наведеного магнітного поля у об'єкті контролю формується струм Фуко, який у свою чергу впливає на струм у котушці. По змінам у результуючому струмі і визначається наявність або відсутність дефекту. Більш детально це виглядає як наступним чином:

При пропусканні змінного струму через котушку генерується змінне магнітне поле (показано червоним).

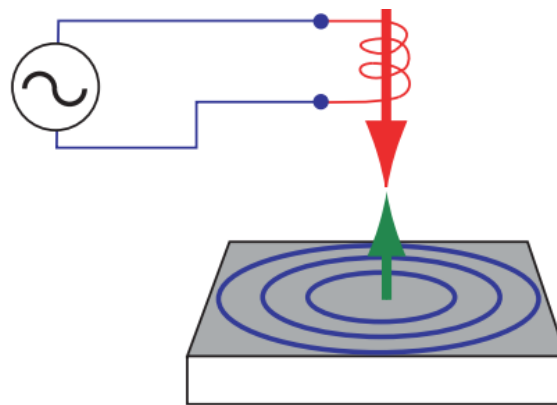


Рис. 1.17 Магнітні поля в котушці та в об'єкті контролю

Оскільки котушку розташовують поблизу струмопровідного тестового зразка, магнітне поле викликає вихрові струми (показано синім кольором).

Протікання вихрових струмів залежить від фізичних і електричних характеристики досліджуваного зразка; вихрові струми уникають тріщин, віддаючи перевагу областям з більшою провідністю. Так як вихрові струми протікають у тестовому зразку, вони створюють власне магнітне поле (показано зеленим кольором). Воно взаємодіє з магнітним полем, створюваним котушкою

і змінює свій імпеданс. Прилади вимірюють і відображають ці зміни імпедансу, щоб дозволити спеціалісту отримати важливу інформацію про властивості та стан випробного зразка або об'єкту контролю.

Вказаний метод виявлення дефектів надає важливі переваги для неруйнівного контролю металів і має дуже широкий діапазон застосування. За допомогою цього методу можна проникати в шари матеріалу, щоб виявити приховані пошкодження, які можуть загрожувати працездатності та цілісності матеріалу[11].

Можливості застосування:

- Поверхнева та під-поверхнева дефектоскопія;
- Обстеження багат шарових конструкцій;
- Вимірювання товщини металу та покриття;
- Сортування металу за маркою, термообробкою та твердістю.

Переваги:

- Висока чутливість до мікроскопічних дефектів;
- Висока швидкість перевірки;
- Простота автоматизації;
- Простота навчання персоналу;
- Швидкий у використанні;
- Безконтактність;
- Не витрачається матеріал;
- Економічні;
- Безпечний для довкілля.

Поширення магнітного поля в речовині залежить від його властивостей. Властивість речовини сприяти поширенню силових ліній поля називається

магнітною проникністю μ . Матеріал, поміщений у магнітне поле, буде не тільки проводити його через себе, а й посилювати чи послаблювати. Залежно від величини магнітної проникності всі речовини поділяються на три класи[13]:

Діамагнетики - $\mu \approx 1 - 0,00001 < 1$ - при внесенні в магнітне поле незначно послаблюють його (до діамагнетиків відносяться такі речовини як мідь, золото...);

Парамагнетики - $\mu \approx 1 + 0,00001 > 1$ - незначно посилюють магнітне поле (парамагнетики - алюміній, повітря...);

Феромагнетики - $\mu \gg 1$ - у сотні, тисячі разів підсилюють магнітне поле (феромагнетики - залізо, сталь ..., феромагнетики, поміщені в магнітне поле, намагнічуються (набувають власне магнітне поле)).

Щільність вихрових струмів у масиві струмопровідного матеріалу не рівномірна. Розподіл вихрових струмів за обсягом струмопровідного середовища супроводжується зміною амплітуди та фази. Так при збудженні вихрових струмів у листі металу котушкою з струмом, що протікає по її витках, максимальна щільність вихрових струмів спостерігатиметься в поверхневому шарі об'єкта безпосередньо під витками котушки. При віддаленні вздовж поверхні від витків котушки щільність вихрових струмів зменшуватиметься за законом, близьким до експоненційного. Також із збільшенням глибини вихрові струми більше відстають по фазі від поверхневих.

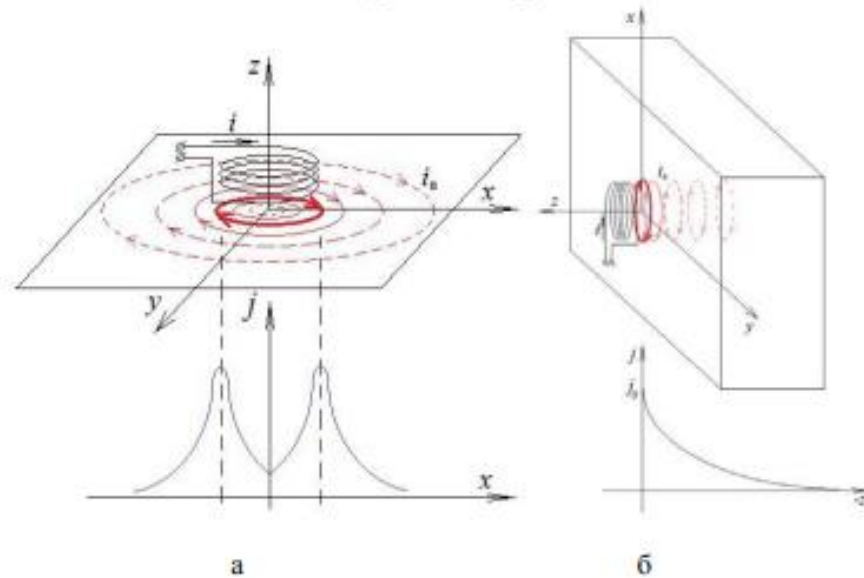


Рис. 1.18 Розподілення вихрових струмів у струмопровідному середовищі: у поверхневому шарі (а); у глибині об'єкту (б)

Глибина проникнення вихрових струмів

Глибина вихрових струмів залежить від величини магнітного потоку, що їх збуджує, частоти збудження та електромагнітних властивостей матеріалу об'єкта. Для оцінки глибини вихрових струмів використовують відносну величину – умовну глибину проникнення вихрових струмів. Умовна глибина проникнення вихрових струмів (1.6) – це відстань від поверхні об'єкта контролю (де спостерігається максимальна щільність вихрових струмів) до шару в якому щільність зменшується в e раз ($e \approx 2,71$ – основа натурального логарифму):

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \mu_0 \sigma}} \quad (1.6)$$

де f – частота струму збудження, $\mu \mu_0$ – абсолютна магнітна проникність матеріалу об'єкта, σ – питома електрична провідність матеріалу об'єкта.

Вихроструміві перетворювачі

Вихрострумівий метод заснований на аналізі взаємодії електромагнітного поля перетворювача з електромагнітним полем вихрових струмів, що збуджуються перетворювачем в об'єкті контролю.

Вихрострумний метод застосовується для контролю виробів із струмопровідних матеріалів.

Метод використовується для вирішення наступних завдань:

1. Виявлення металевих предметів (вихрострумні металошукачі);
2. Вимірювання геометричних розмірів (вихрострумні товщиноміри);
3. Структуроскопія (контроль хімічного складу, якості обробки та ін.);
4. Дефектоскопія.

Зміна електромагнітних властивостей середовища чи об'єкта контролю призводить до зміни параметрів вихрових струмів та створеного ними вторинного магнітного потоку. Як наслідок змінюється сумарний магнітний потік системи «перетворювач – об'єкт контролю», що у свою чергу призводить до зміни електричних параметрів (опір, струм, е.р.с.) вимірювальної обмотки перетворювача, які відстежуються з приладів, включених у вимірювальний ланцюг.

Абсолютні та диференціальні перетворювачі

За способом з'єднання вимірювальних обмоток перетворювачі поділяються на абсолютні та диференціальні.

Абсолютні вихреструмні перетворювачі (ВСП) зазвичай мають одну вимірювальну обмотку абсолютне значення сигналу якої (струм, напруга або е.д.с) зчитується вимірювальною схемою приладу та відображається на індикаторах. По зміні сигналу судять зміни параметрів об'єкта контролю.

Диференціальні ВСП мають як мінімум дві вимірювальні обмотки, включені зустрічно. Вимірювальний ланцюг зчитує різницю сигналів вимірювальних обмоток, щодо зміни якої судять про зміни параметрів об'єкта контролю. Використання диференціальних ВСП дозволяє компенсувати вплив зовнішніх магнітних полів, не пов'язаних з об'єктом контролю, так як величина

паразитного сигналу, наведеного зовнішнім полем, у кожній вимірювальній обмотці однакова та їх різниця дорівнюватиме нулю.

При абсолютних вимірах зчитуються показання основної величини (її абсолютного значення) з використанням значення фізичної константи.

Диференціальний метод вимірювань заснований на порівнянні однієї величини з іншою величиною (загальної фізичної константи), що має відоме значення, іноді званої опорної. Результат виміру представлений як різниця двох величин. Вихрострумові перетворювачі можуть бути абсолютними або диференціальними[14].

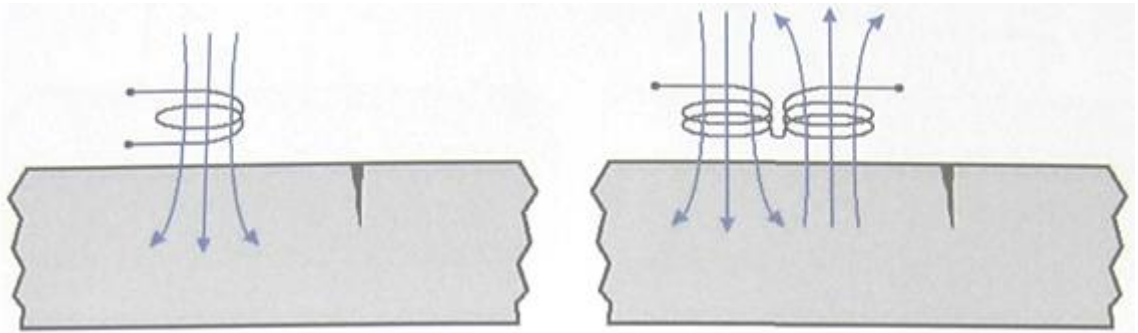


Рис. 1.19 Абсолютний (лівий малюнок) та диференціальний (правий малюнок) перетворювачі

1.5. Висновки до розділу I

Існує багато об'єктів цілісність яких потребує ретельного контролю, але ось для забезпечення цілісності і водночас правильного контролю підходять не всі методи контролю. Контроль багат шарових конструкцій, або контроль всередині об'єкта без його руйнації чи деформації це вже робота для неруйнівного контролю. Є багато видів неруйнівного контролю: акустичний, вихрострумний, радіохвильовий, тепловий, оптичний, магнітний та найпростіший візуальний (та інші).

Акустичний, а саме ультразвуковий використовують найчастіше для контролю рейок. П'єзокерамічний датчик генерує ультразвукові коливання, які посилюються у об'єкт контролю, а потім аналізується відсутність або присутність сигналу у відповідь. Є ультразвукові методи які можуть бути використані маючи доступ хоча б до однієї поверхні (ехо-імпульсний метод), а є такі для яких обов'язково мати доступ до двох різних сторін об'єкту контролю (тіньовий метод).

Також використовують вихрострумний метод для контролю рейок. Особливістю є датчик з котушкою, які своїм магнітним полем збуджують вихрові токи у об'єкті контролю. При перетині полем котушки зони з перпендикулярно розташованими до вихрових струмів дефектами, вихрові токи розриваються і ми отримуємо сигнал про наявність дефекту.

Використання суперпозиції цих методів дає змогу мінімізувати вплив їх слабких сторін на загальний результат контролю та підвищити загальну точність дослідження стану рейки.

Розділ 2

ОГЛЯД ОБ'ЄКТУ КОНТРОЛЮ – РЕЙОК ЗАЛІЗНИЧНИХ

2.1. Аналіз об'єкту контролю

Потяги є одним із найшвидших та найпотужніших засобів транспортування та пересування по суші, який відіграє значну роль у сталому економічному розвитку сучасного світу. Для використання вказаного транспорту потрібно забезпечити безперебійне та надійне пересування потягів по якісно вкладеним та надійним коліям. Залізничні колії необхідні для руху поїздів, і складаються з рейок, опор, шпал і дорожнього полотна для розподілу навантаження поїзда. Рейки постійно підлягають дії пошкоджуючих факторів – тертя об колеса потягів, дій ваги потягів та погодних факторів. Ці фактори суттєво впливають на максимально можливий термін експлуатації як рейкового, так і рухомого складу. Рейки постійно піддаються дії втомного навантаження внаслідок тертя об колеса поїзда, а також дефекти рейки можуть виникати через корозію, викликану зовнішнім середовищем (клімат тощо)[15] чи пошкодження під час виробництва або експлуатації. Дія навантажень [16] приведена на Рис. 2.1. У рамках розділу будуть розглянуті рейки різних типів.

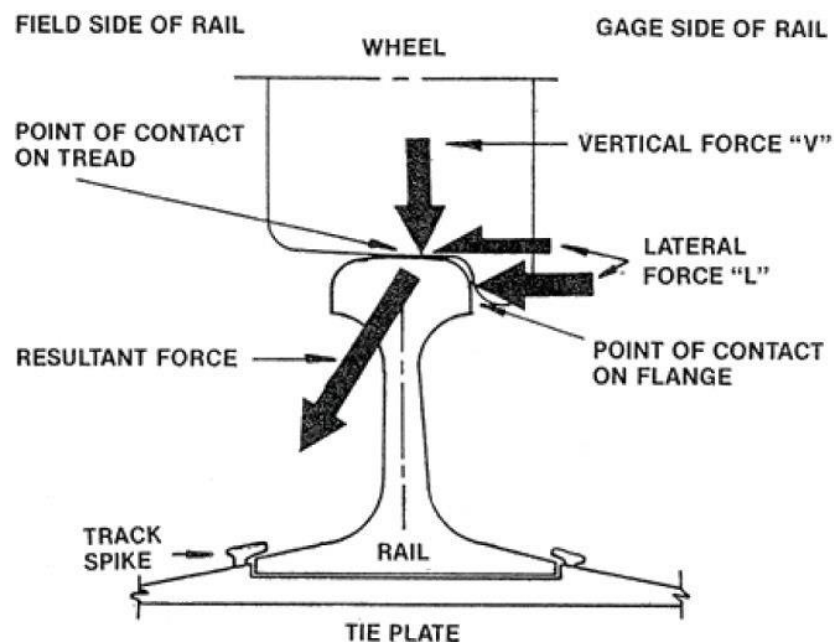


Рис. 2.1 Дія навантажень на рейку

2.2. Аналіз будови, хімічного складу та фізичних характеристик рейок широкої колії

Рейки використовуються як у колії, що використовується для руху потягів - наприклад Р-50 (Рис. 2.2), так і у колії, котра слугує для переміщення допоміжного рухомого складу, зокрема кранів. Для рейок широкої колії також буде окремо розглянуто рейки Р-60 та Р-75. Уся подальша інформація щодо рейок широкої колії узятa із джерела¹.

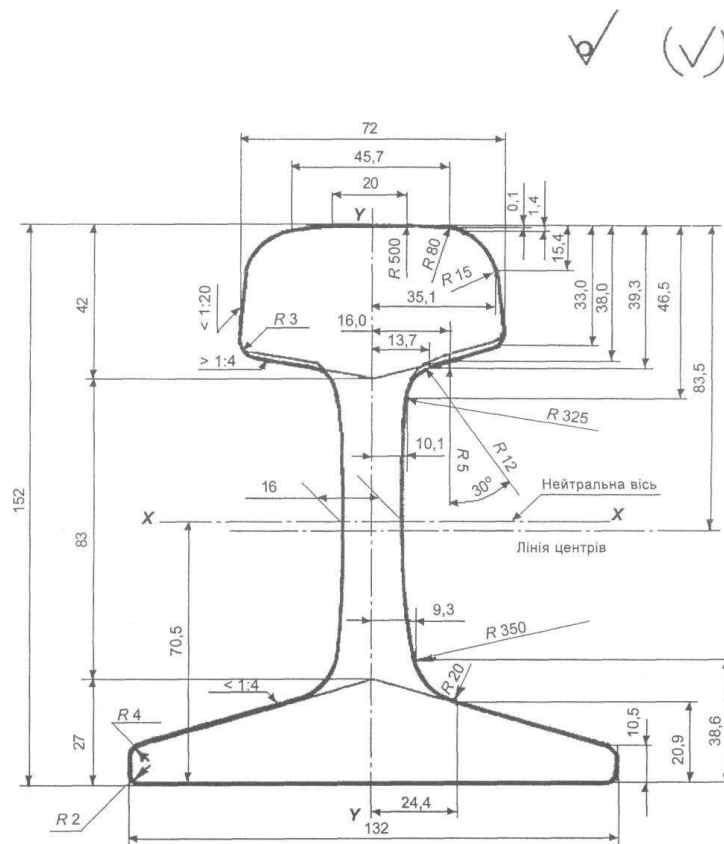


Рис. 2.2 Схема рейки широкої колії

Через різницю у їх використанні, вказані рейки мають значні розбіжності у будові а також у хімічному складі металів (Таблиця 2.1), з яких вони

¹ ДСТУ 4344:2004 Національний стандарт України. Рейки звичайні. Для залізниць широкої колії

виготовлені. Ці розбіжності також можуть бути значимими для акустичних властивостей рейок.

Власне акустичні властивості залежать від розміру зерна металу. Вони визначатимуть рівень загасання сигналу у металі рейки (приклад наведено на), котра буде об'єктом контролю – ОК.

Таблиця 2.1 Хімічний склад рейкової сталі

Марка сталі	Масова частка елементів, відсоток							
	Вуглець	Марганець	Кремній	Ванадій	Титан	Фосфор	Сірка	Алюміній
						Не більше		
M74Ф	0,69 – 0,80	0,80 – 1,30	0,18 – 0,40	0,03 – 0,07	–	0,035	0,040	0,015
K74Ф	0,69 – 0,80	0,80 – 1,30	0,18 – 0,40	0,03 – 0,07	–	0,035	0,040	0,015
E74Ф	0,69 – 0,80	0,80 – 1,30	0,18 – 0,40	0,03 – 0,07	–	0,030	0,025	0,015
M74Т	0,69 – 0,80	0,80 – 1,30	0,18 – 0,40	–	0,007-0,0025	0,035	0,040	0,015
K74Т	0,69 – 0,80	0,80 – 1,30	0,18 – 0,40	–	0,007-0,0025	0,035	0,040	0,015
E74Т	0,69 – 0,80	0,80 – 1,30	0,18 – 0,40	–	0,007-0,0025	0,030	0,025	0,015
M74	0,69 – 0,80	0,80 – 1,30	0,18 – 0,40	–	–	0,035	0,040	0,025
K74	0,69 – 0,80	0,80 – 1,30	0,18 – 0,40	–	–	0,035	0,040	0,025
E74	0,69 – 0,80	0,80 – 1,30	0,18 – 0,40	–	–	0,030	0,025	0,025
M76Ф	0,71 – 0,82	0,80 – 1,30	0,25 – 0,45	0,03 – 0,07	–	0,035	0,040	0,015
K76Ф	0,71 – 0,82	0,80 – 1,30	0,25 – 0,45	0,03 – 0,07	–	0,035	0,040	0,015
E76Ф	0,71 – 0,82	0,80 – 1,30	0,25 – 0,45	0,03 – 0,07	–	0,030	0,025	0,015
M76Т	0,71 – 0,82	0,80 – 1,30	0,25 – 0,45	–	0,007-0,0025	0,035	0,040	0,015
K76Т	0,71 – 0,82	0,80 – 1,30	0,25 – 0,45	–	0,007-0,0025	0,035	0,040	0,015
E76Т	0,71 – 0,82	0,80 – 1,30	0,25 – 0,45	–	0,007-0,0025	0,030	0,025	0,015
M76	0,71 – 0,82	0,80 – 1,30	0,25 – 0,45	–	–	0,035	0,040	0,025
K76	0,71 – 0,82	0,80 – 1,30	0,25 – 0,45	–	–	0,035	0,040	0,025
E76	0,71 – 0,82	0,80 – 1,30	0,25 – 0,45	–	–	0,030	0,025	0,025

Примітка. Допускають залишковий вміст у рейковій сталі хрому, нікелю і міді, що не перевищує 0,15% кожного, за сумарної масової частки цих елементів не більше ніж 0,30%.

Вказаний рівень загасання буде визначати втрати потужності під час проведення безпосереднього контролю ОК. Ці втрати можуть зробити контроль неможливим, тому мають бути враховані попередньо. Окрім того необхідно звернути увагу на частотну залежність загасання [3] (Рис. 2.3).

Відповідно до приведеного рисунку коефіцієнт загасання зростає як із ростом частоти, так і з ростом зерна металу. Тому при подальших розрахунках при побудові скануючого пристрою необхідно враховувати цю залежність із метою отримання найбільш оптимального результату.

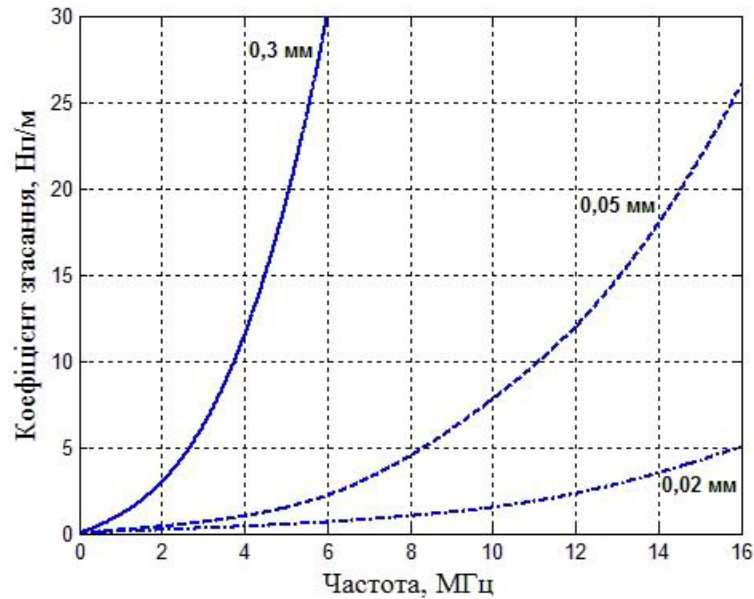


Рис. 2.3 Залежність загасання від розміру зерна

Також варто вказати, що ще одним непрямим визначником коефіцієнту загасання можуть бути також і механічні характеристики матеріалу ОК. Вказані характеристики для рейок широкої колії приведено у Таблиця 2.2.

Таблиця 2.2 Механічні властивості рейок широкої колії

Категорія рейки	Механічні властивості				
	Тимчасовий опір σ_B , Н/мм ² (кгс/мм ²)	Границя текучості, $\sigma_{0,2}$, Н/мм ² (кгс/мм ²)	Відносне видовження δ , %	Відносне звуження Ψ , %	Ударна в'язкість КСУ, Дж/см ² (кгс·м/см ²)
Не менше					
Вища	1290 (131)	850 (87)	10,0	30,0	15(1,5)
I	1196 (122)	800 (82)	8,0	25,0	25(2,5)
II	1137(116)	740(76)	6,0	25,0	15(1,5)
III	900(92)	—	5,0	—	—

2.3. Аналіз будови, хімічного складу та фізичних характеристик рейок кранового господарства

Будову рейки для кранового господарства приведено на Рис. 2.4, а інформація про неї отримана із джерела². Розшифровка приведених параметрів наведена у Таблиця 2.3. Ця таблиця показує великий розкид параметра S_2 , котрий визначає ширину активної зони скануючого пристрою (тобто діаметр п'єзоелементу) при встановленні нового скануючого пристрою на поверхню кочення рейки. При зміні типу рейок вона зростає від 23 до 56 міліметрів, що може викликати необхідність використовувати більше одного скануючого пристрою при контролю рейки із поверхні кочення.

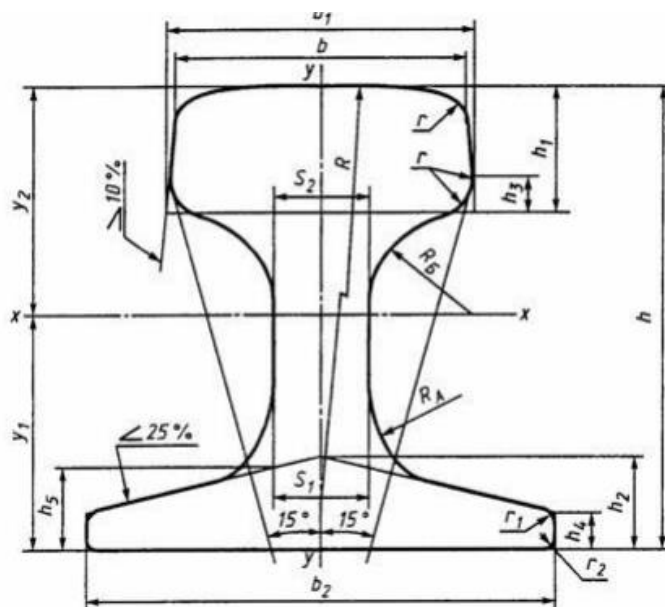


Рис. 2.4 Будова рейки кранового господарства

Таблиця 2.3 Розміри рейки кранового господарства (у міліметрах)

Тип рейок	b	b_1	b_2	s_1	s_2	h	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5	R	R_A	R_B	r	r_1	r_2
КР70	70,0	75,6	120,0	21,0	23,0	120,0	28,0	24,0	6,0	9,00	21,375	400,0	25,0	25,0	6	6	1,5
КР80	80,0	87,0	130,0	26,0	28,0	130,0	35,0	26,0	10,0	9,75	22,750	400,0	30,0	30,0	8	6	1,5
КР100	100,0	108,0	150,0	32,0	34,0	150,0	40,0	30,0	11,5	11,25	22,250	450,0	35,0	35,0	8	8	2,0
КР120	120,0	129,0	170,0	38,0	40,0	170,0	45,0	35,0	13,0	13,75	31,150	500,0	40,0	48,0	8	8	2,0
КР140	140,0	150,0	170,0	56,0	58,0	170,0	50,0	40,0	14,0	18,75	35,000	700,0	40,0	50,0	10	10	3,0

² ДСТУ 2484-94 Рейки кранові. Технічні умови (ГОСТ 4121-96, ІДТ). 3 Поправкою

Хімічний склад рейок кранових приведено у Таблиця 2.4. Із цієї таблиці видно те, що рейки виготовляються із сталі однієї марки та можуть мати у своєму складові певну кількість домішок, сама кількість яких досить значна.

Таблиця 2.4 Хімічний склад рейки кранового господарства

Марка сталі	Масова частка елементів у відсотках								
	Вуглець	Марганець	Кремній	Сірка	Фосфор	Миш'як	Хром	Нікель	Мідь
63	0,53-0,73	0,60-1,00	0,15-0,35	0,050	0,050	0,08	0,30	0,30	0,30

Окремо варто розглянути вплив кожної із домішок на властивості сталі. Із ростом вмісту вуглецю твердість, міцність й пружність сталі підвищуються, але параметри пластичності й міцності знижуються, а окрім того більше проявляються схильність до старіння і холодноламкості. Саме тому ріст вмісту вуглецю призводить до зниження зварюваності та оброблюваності металу[17].

Марганець же являє собою аустенітоутворюючу речовину, котра покращує здатність сталі сприймати загартування і збільшує поріг здатності до лиття металу. Окрім того наявність марганцю підвищує опір стиранню та дії ударних навантажень[18].

У той самий час кремній не впливає на в'язкі властивості, однак при цьому значно підвищує межу міцності і плинності, магнітну проникність та електропровідність металу. Одночасно із цим його наявність покращує результуючі пластичність, кислотостійкість і міцність сталі [18].

Механічні властивості цих рейок показано ж у Таблиця 2.5.

Таблиця 2.5 Механічні властивості рейки кранового господарства

Тимчасовий опір σ_B , Н/мм ² (кгс/мм ²)	Границя текучості σ_T , Н/мм ² (кгс/мм ²)	Відносне видовження δ , %	Твердість на поверхні катання головки, <i>HV</i>
Не менше			
730(75)	370(38)	6,0	212

2.4. Порівняльний аналіз рейок широкої колії та кранового господарства

В першу чергу необхідно звернути на те, що для рейок широкої колії Р50 ширина шийки складає 16 мм, для Р60 – 18 мм, для Р75 – 20 мм. Тобто при встановленні сканеру у класичний спосіб не потрібно використовувати його додаткові копії на відміну від рейок кранових.

При використанні ж нестандартного способу встановлення (на бокову – рекомендовано – робочу – грань рейки) для вищенаведених типів рейок можна встановити ширину п'єзоелементу відповідно до Таблиця 2.6.

Таблиця 2.6 Рекомендовані габарити п'єзоелементів

h1	h3	r	Рекомендована ширина п'єзоелементу	Марка рейки
28	6	6	16	КР70
35	10	8	17	КР80
40	11,5	8	20,5	КР100
45	13	8	24	КР120
50	14	10	26	КР140
33	15,4	3	14,6	Р50
35,6	15,7	3	16,9	Р65
46	15,6	3	27,4	Р75

Із наведеного матеріалу видно, що хоча хімічний склад матеріалів для рейки широкої колії та кранової рейки близький для вуглецю, марганцю та кремнію, у їх фізичних властивостей існують розбіжності (гірші показники у кранової рейки). Ці розбіжності викликані наявністю додаткових легуючих та забруднюючих домішок у матеріалі кранової рейки.

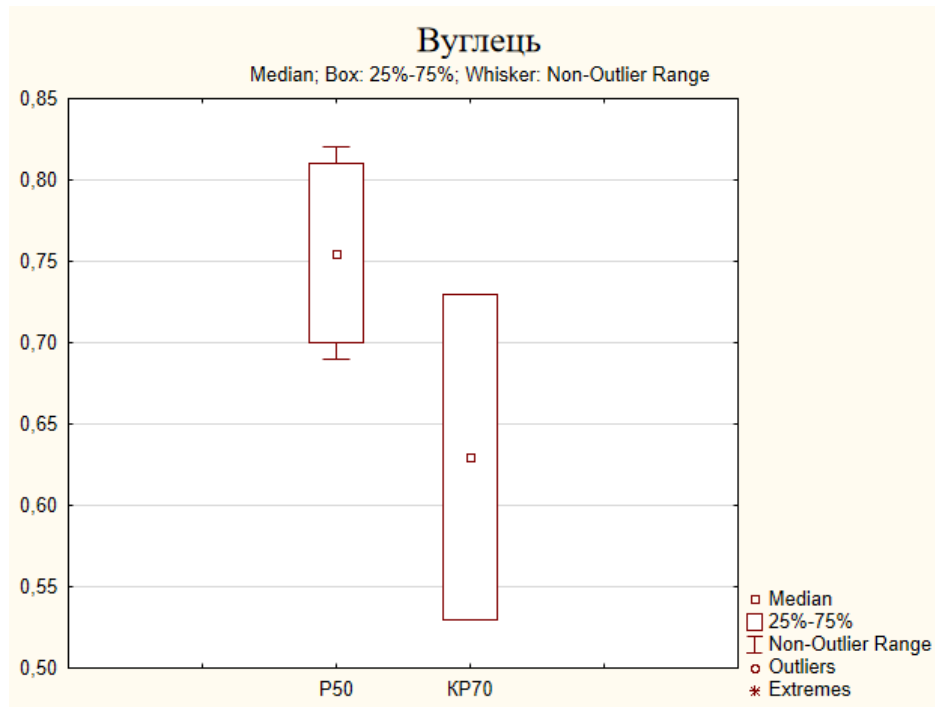


Рис. 2.5 Вміст вуглецю у рейці широкої колії (P50 для зручності) та кранової рейки (KP70 для зручності)

Із графіку на Рис. 2.5 видно, що по верхній межі вмісту сталі кранових рейок відповідає діапазоніві вмісту вуглецю у рейках широкої колії.

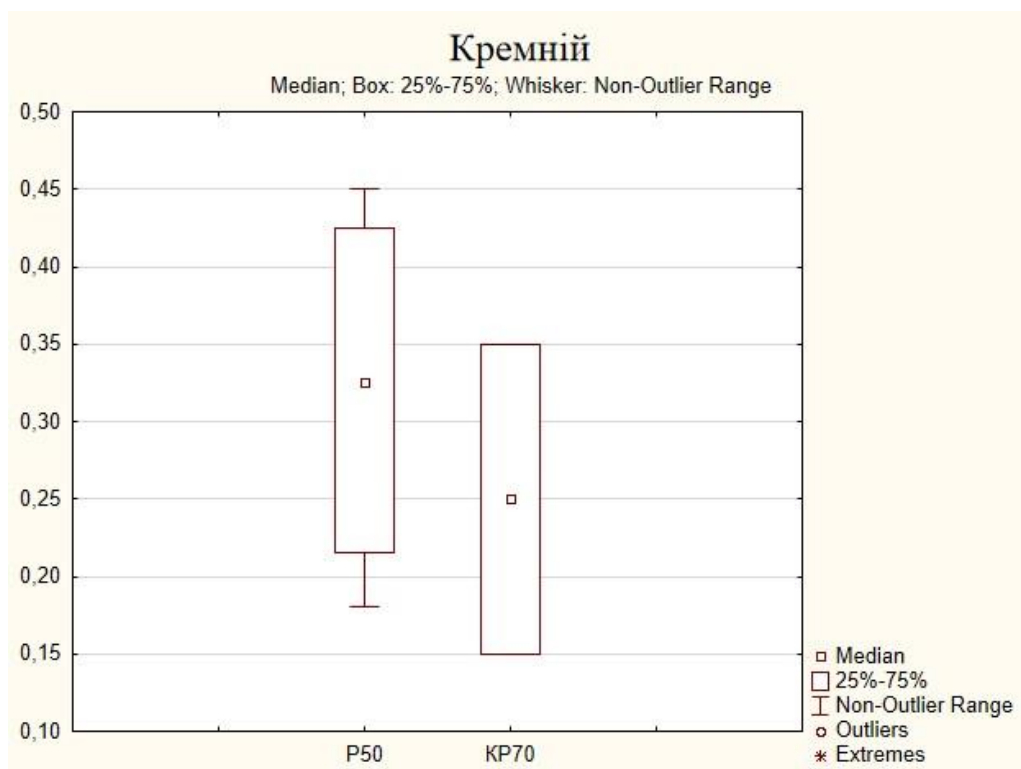


Рис. 2.6 Вміст кремнію у рейці широкої колії (P50 для зручності) та кранової рейки (KP70 для зручності)

Рис. 2.6 показує приблизну відповідність вмісту кремнію у сталі рейки широкої колії та кранової рейки відповідно.

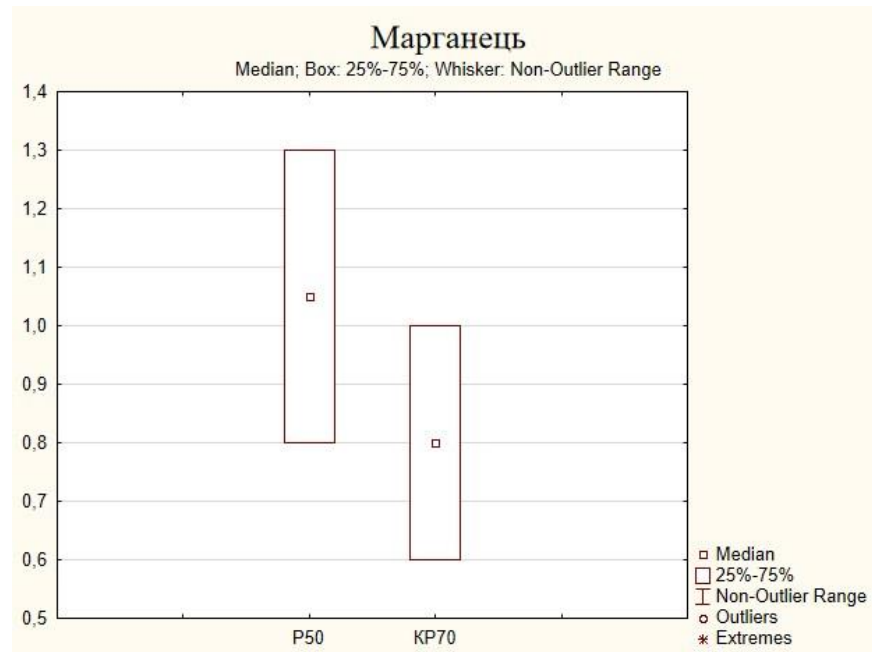


Рис. 2.7 Вміст марганцю у рейці широкої колії (P50 для зручності) та кранової рейки (KP70 для зручності)

Приведена на Рис. 2.7 залежність також показує приблизну відповідність вмісту марганцю у різних видах рейок.

Із наявних джерел відомо, що збільшення вмісту вуглецю призвело до зменшення середнього розміру зерна фериту[19] та було помічено, що розмір зерен був трохи меншим, чим вищий вміст вуглецю[20].

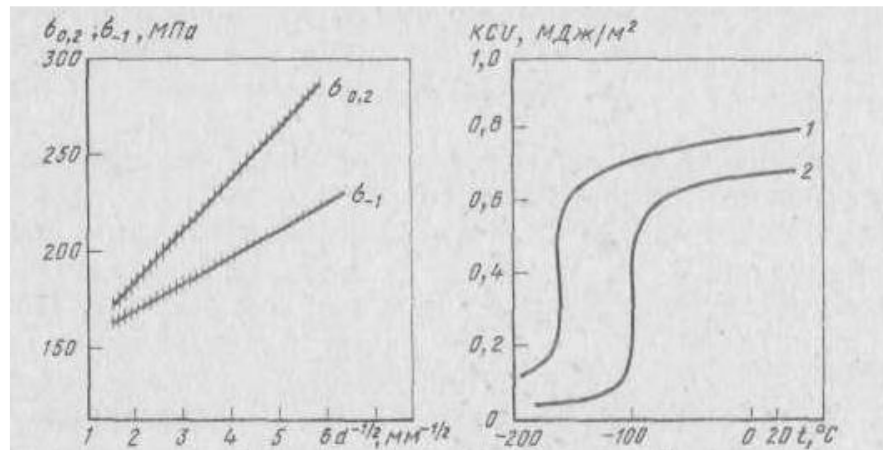


Рис. 2.8 Вплив розміру зерна d на умовну межу текучості σ_T , межу витривалості σ_{-1} та ударну в'язкість (поріг холодноломкості), де 1 – дрібне зерно (0,04 мм.),
2 – велике зерно (0,09 мм.)

Як показано раніше чим менше зерно, тим вище міцність (σ_B , σ_T , σ_{-1}), пластичність (δ , ψ) та в'язкість (KCU , KCT), нижче поріг холодноломкості (t_{50}) та менше схильність до крихкого руйнування. [21]

Зважаючи на те, що коефіцієнт загасання зростає з ростом зерна металу, то можна зробити висновки про більший розмір зерна у металі саме кранових рейок і відповідно більше загасання у ньому.

2.5. Висновок до розділу II

Під час аналізу будови рейок було визначено максимальний габарит п'єзоперетворювача для використання його для контролю рейок як кранового господарства, так і широкої колії.

Зважаючи на близькість хімічних складів сталей, з яких виготовлено рейки, було зроблено висновок про можливість використання ультразвукового методу контролю для їх неруйнівного контролю із використанням ультразвукового методу контролю.

Незважаючи на близькість хімічних складів сталей, з яких виготовлено рейки різних видів, у них все таки присутні розбіжності, котрі викликають збільшення розміру зерна у сталі кранових сталей. Цей факт було встановлено опосередковано, через аналіз фізичних властивостей рейок.

Зважаючи на частотну залежність загасання загалом можна зробити висновок про необхідність зниження застосовуваної частоти для контролю кранових рейок.

Вищезазначений контроль може проводитись із використанням сканерів різних видів та їх різних місць встановлення - не лише із поверхні кочення, а й із робочої грані рейки.

Розділ 3

Огляд можливостей практичного застосування неруйнівного контролю рейок

3.1. Аналіз навантажувальних впливів на рейку. Проблемні види пошкоджень рейки

Наразі виникає все більше вимог до якості проведення неруйнівного контролю рейкового господарства залізничних шляхів основної колії та її допоміжних елементів. Ці вимоги викликані як і збільшенням середнього вантажного потоку, так і збільшенням швидкості вказаних перевезень. Контактна зона рейки [22] показана на Рис. 3.1.

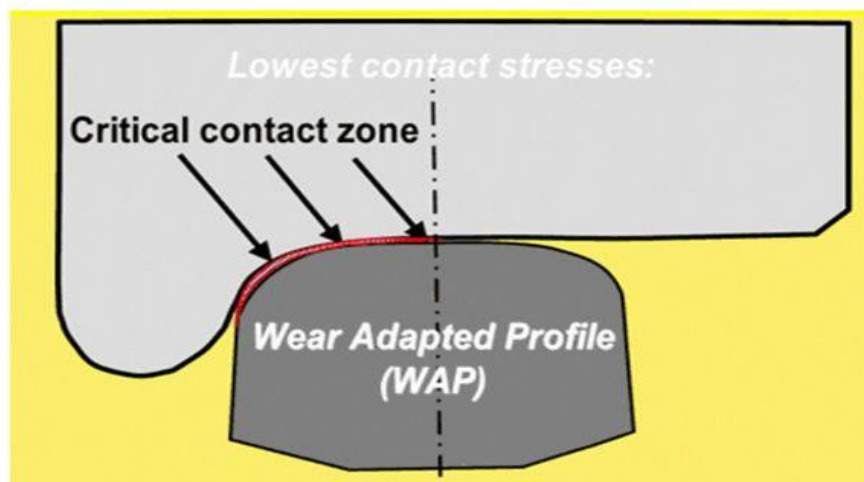


Рис. 3.1 Контактна зона рейки

Зростання швидкості руху потягів вимагає також збільшення швидкості проведення контролю рейок, що в свою чергу обмежує час проведення контролю безпосередньо на перегоні.

Метою даного розділу є визначення зон контролю при використанні найпоширеніших методів неруйнівного контролю рейок. Зазначені зони є узагальненими для різних типів рейок, які укладаються у залізничну колію (P50, P60) та кранових рейок. Загальним для усіх вказаних зон є те, що вони не є типовими та вимагають розміщення сканеру із застосовуваними датчиками не у загальноприйнятій спосіб.

Поздовжні залишкові стресси[23] на рейку приведено на Рис. 3.2. З нього видно, що залишкова напруга стиснення характерна для поверхні кочення головки рейки у зоні контакту із колесом, а напруга розтягнення для центральної частини головки рейки у проекції шийки та підовши у проекції шийки.

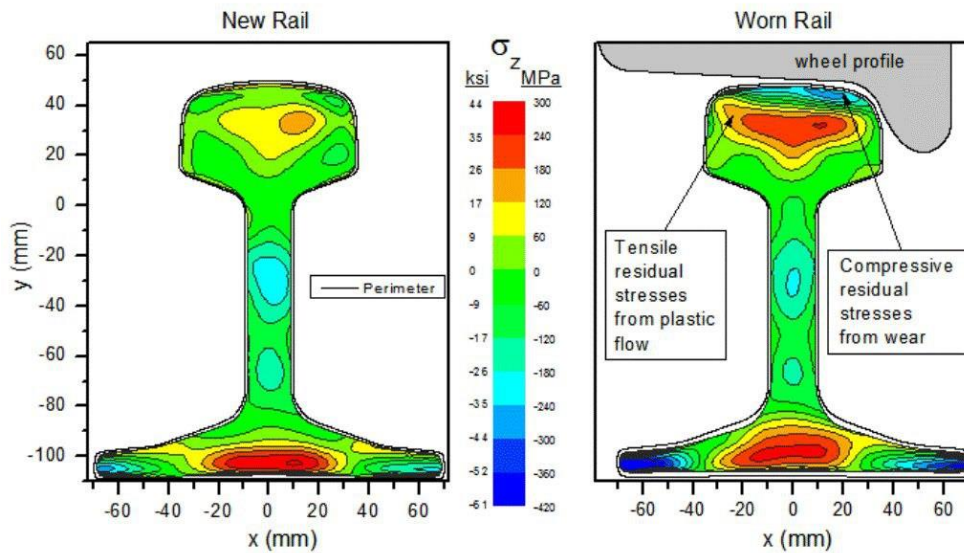


Рис. 3.2 Поздовжні залишкові стресси у рейці

Розтягнення рейки у головці у проекції шийки може призводити до зміни профілю головки рейки Рис. 3.3.



Рис. 3.3 Деформація головки рейки

Також через наявність у головці рейки залишків раковини, вираженої ліквіації та заворотів кірки може під час експлуатації привести до вертикальних розшарувань головки рейки (зокрема у проекції шийки) [24].

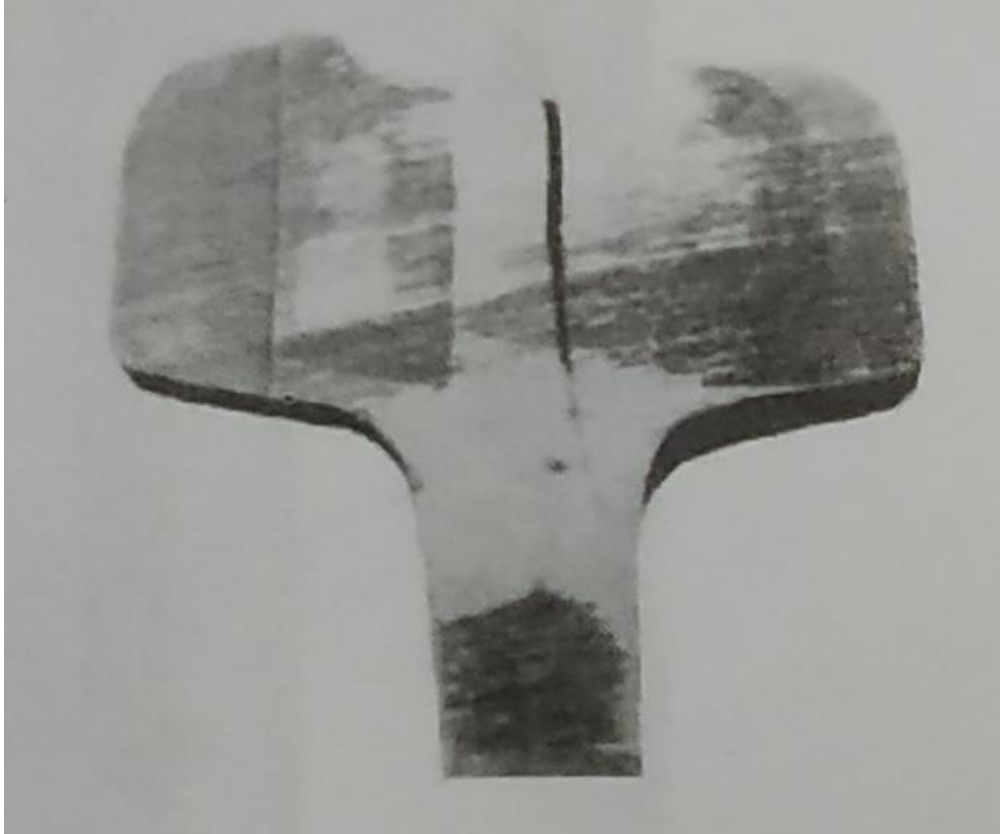


Рис. 3.4 Поздовжнє розшарування головки рейки

Ці розшарування не виявляються класичними методами ультразвукового контролю рейки прямим датчиком а тому використання нестандартного місця встановлення датчику зможе покращити ситуацію із виявленням дефектів такого роду.

3.2. Типові зони контролю рейки

Для забезпечення достовірного тестування повинні бути передбачені надійні скануючі прилади. На первірній часом основі вони тестуються за допомогою спеціально адаптованого маневреного двигуна, який автоматично маркує підозрілі ділянки рейок Рис. 3.5. Останні тоді оглядаються вручну за допомогою зонда SE або кутового зонда (тандемна процедура). Такий самий порядок дій дотримується при огляді термічно-зварних з'єднань при ремонті та обслуговуванні залізничних рейок[25].

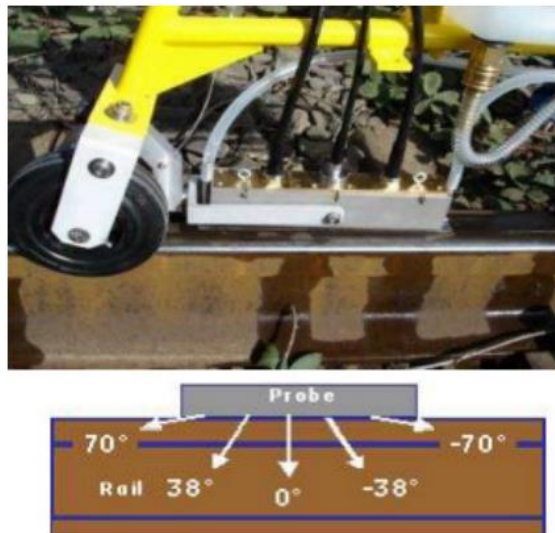


Рис. 3.5 Тандемна процедура контролю рейки

Вихрострумний метод здатий перевірити верхній шар рейки на наявність несцільностей та різних дефектів (Рис. 3.6 та Рис. 3.7) з глибиною майже до 10 мм[25].

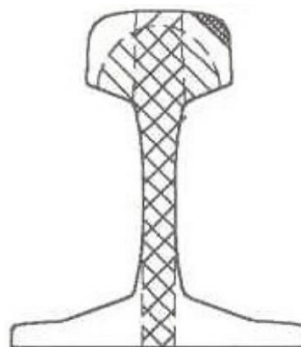


Рис. 3.6 Зони які перекривають вихрострумний та ультразвуковий методи

КОНТРОЛЮ РАЗОМ

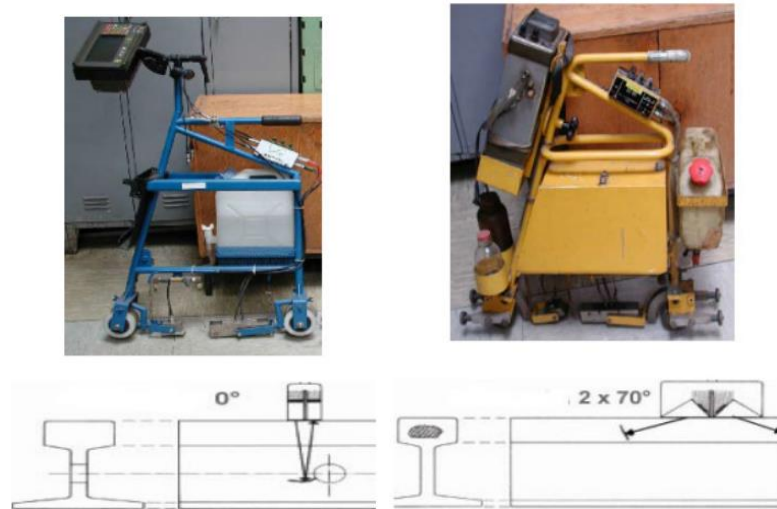


Рис. 3.7 Прямий та кутовий датчики контролю рейок та їхні схеми контролю

3.2.1. Тандемна процедура ультразвукового та вихреструмового контролю рейки, прийнята у західних країнах

Одна з систем тандемного контролю була реалізована в поїзді для перевірки залізниць SPZ1 PLR, Магдебург, Німеччина, у 2008 році[26].

Для перевірки рейок було використано десять ультразвукових датчиків і чотири вихреструмових датчики на рейку.

Є два зонди променя 2 МГц під кутом 70° , два зонди променя 4 МГц під кутом 70° і один нормальний датчик 4 МГц 0° , що використовуються для головки рейки, два 2 МГц 55° і два 2 МГц 35° кутові датчики променя, що використовуються для рейкового полотна та опори рейки. Один нормальний зонд 4 МГц 0° також використовується для перевірки контакту.

Ультразвуковий датчики працюють у режимі ехо-імпульсу, за винятком звичайного зонда 4 МГц 0° , який використовується для головки рейки, який працює в режимі передавач-приймач.

Чотири вихреструмових датчика розташовані в область, де відбувається контакт кочення. Вони вирівнюються за формою головки рейки. Датчики мають доступ до поверхні приблизно 25 мм у куті рейки[26].

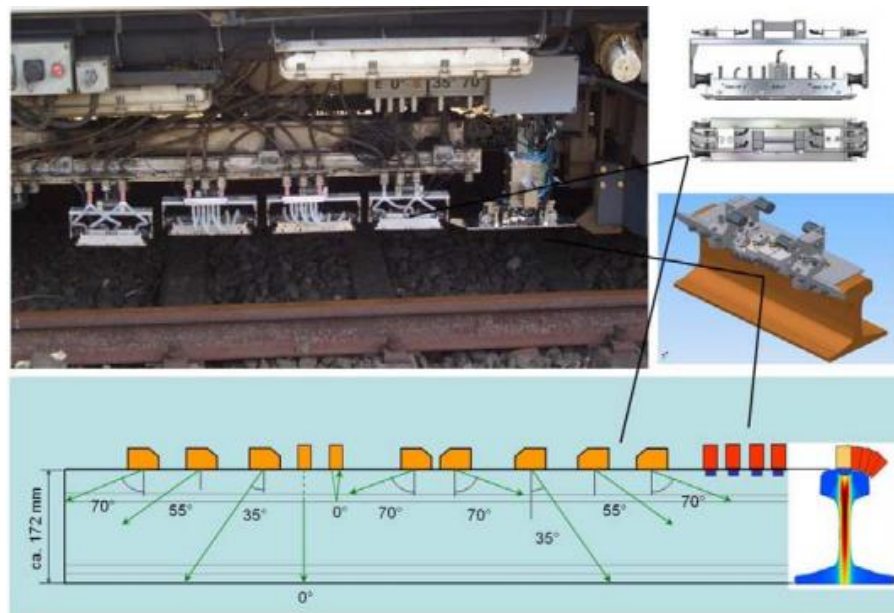


Рис. 3.8. Схеми розташування датчиків для контролю рейки з поверхні кочення

Датчики встановлюються на п'ять спеціально розроблених тримачів для датчиків, оптимізованих під кожного датчика окремо. Існують чотири основні проблеми для оптимізації продуктивності тримачів для датчиків під час розробки: розробка міцної системи утримання з опцією швидкої заміни датчика, збільшення терміну служби датчика, збереження загальної довжини системи якомога меншою, а також можливість мінімізування споживання сполучної речовини для ультразвукового контролю [26].

Для ультразвукового контролю використовуються чотири датчики, зміцнені твердосплавними протекторами які містять два або три ультразвукові зонди. Кожен зонд фіксується в положенні пружинами з налаштованим натягом. датчики налаштовані спеціальним калібрувальним пристроєм на зазор 0,2 мм між головкою рейки та підшовою датчика, щоб зберегти мінімальне стирання та оптимальне з'єднання. Тримачі оснащені залежним від напрямку та з регульованою швидкістю подачею сполучної речовини. Для кожного датчику є невеликий резервуар для води та стравлювач. Для легкого доступу під час зарядки тримачі з датчиками мають механізм нахилу, що замикається та відмикається за потреби [26].

Чотири датчики вихрових струмів розташовані над кожною рейкою за допомогою тримача типу візка. Чотири датчики встановлені на модульному механізмі, що дозволяє індивідуальне позиціонування вимірювальних доріжках. Датчики встановлені на направляючому пристрої, який перевозиться вимірювальним візком. За допомогою спеціального калібрувального пристрою датчики фіксуються на відстані 1 мм від поверхні нової профільної рейки. Для зношених рейок відстань датчиків може змінюватись залежно від поверхні. Результиуюча зміна чутливості датчика може бути компенсована програмним забезпеченням шляхом аналізу вимірювальних даних у діапазоні від -1 мм до +2 мм.

3.2.2. Тандемна процедура ультразвукового контролю рейки, реалізована українським виробником

На українському підприємстві «Ультракон-Сервіс», котре є партнером кафедри, було реалізовано тандемну процедуру контролю рейки на базі приладу OKOSCAN 73HS[27].

Ультразвуковий тракт представлений наступними групами перетворювачів:

- три перетворювача з кутом нахилу 70 градусів, 2 МГц;
- один перетворювач з кутом нахилу 50 градусів, 2 МГц;
- один перетворювач з кутом нахилу 37 градусів, 2 МГц (бокового огляду);
- один прямий перетворювач, 4 МГц[27].

Для перевірки центральної та бічної (робочої та неробочої) поверхонь головки рейки на наявність поперечних тріщин використовуються (три) перетворювача з кутом нахилу 70 градусів. Перетворювачі сканують головку рейки в двох напрямках, по напрямку руху та у зворотньому напрямі. Це дозволяє виявляти поперечні тріщини різної орієнтації відносно вертикальної площини, в тому числі ті, що розвиваються під горизонтальними розшаруваннями на відстані не більше 50 мм від початку розшарування в напрямку зондування дефектоскопу[28].

Перетворювач з кутом нахилу 50 градусів використовується для перевірки всього поперечного перерізу рейки в проекції полотна рейки, включаючи болтові отвори. Сканування проводиться ехо-імпульсним методом. Акустична перевірка рейки проводиться в двох напрямках – уздовж шляху і назад[28].

Перетворювач з кутом нахилу 37 градусів використовується для перевірки робочої та неробочої граней рейки та її центральної частини. Перевірка рейок проводиться ехо-методом прямим одновідбитим променем і ехо-тіньовим методом (схема «ромб») з направленням випромінювання вздовж траєкторії руху і назад. Для цього використовується одноелементний кут введення - промінь ($55\div 60$) ° (розвернутий на $(32\div 36)$ ° відносно поздовжньої осі у робочій та неробочій гранях рейки). Це дозволяє виявити поперечні дефекти різної орієнтації відносно вертикальної площини рейки[29].

Прямий перетворювач використовується для перевірки всього поперечного перерізу рейки в проекції шийки рейки ехо-технікою та ехо-тіньовим методом. Ехо-тіньовий метод використовується для виявлення дефектів за ослабленням сигналу задньої стінки і дозволяє виявити дефекти які не виявляються ехо-імпульсним методом, і тріщини в отворах під болти. Ехо-тіньовий метод також дозволяє контролювати дефект акустичного контакту, центрування системи пошуку.

Швидкісна вихрострумова система для перевірки рейок OKOSCAN ET 73HS у свою чергу оснащена шістнадцятьма вихрострумовими зондами (BC3) - по вісім на кожну рейку Рис. 3.9.

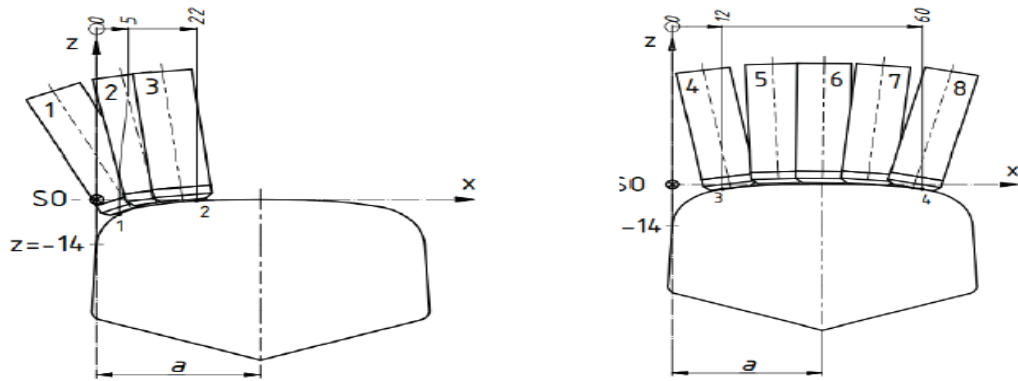


Рис. 3.9 Вихреструмові сканери

Характеристики та технічні характеристики ВСЗ, які використовуються в системі[27]:

- центральна робоча частота 200 кГц;
- орієнтація виявлених дефектів - поперечна, під кутом до осі рейки;
- використання кріпильних візків із зносостійкого матеріалу;
- індивідуальний підвісний кронштейн для кожного візка для однозначного розміщення зондів на різних профілях рейок;
- прогалина між робочою поверхнею ЕЦП і поверхнею рейки для запобігання механічного пошкодження щупів.

Усі ВСЗ розташовані на рейках, щоб забезпечити 100% перевірку робочої кромки та робочої поверхні.

3.3. Оновлені зони контролю рейки

Використання для контролю рейок сканерів із нетиповим місцем встановлення дає операторові нові діагностичні параметри – наявність контакту із бокової грані рейки та встановлена ширина головки рейки для ультразвукового контролю та наявність поверхневих тріщин і контакту сканеру на бокових гранях рейок.

Це дасть змогу при використанні прямого перетворювача контролювати раніше не контрольовані таким методом поздовжні тріщини у головці.

Окрім того використання альтернативного способу встановлення скануючого приладу дасть змогу виявляти і дефекти у вигляді порушення форми головки рейки.

Головним об'єктом контролю під час розгляду даної проблеми є рейки із деформованою головкою (Рис. 3.3). Використання для контролю таких рейок однопиткових дефектоскопів із дворобордними опорними катками може призводити до пошкодження цих катків і виходу з ладу ходової частини дефектоскопу. Також варто зазначити, що організація робочого середовища оператора однопиткового дефектоскопу виключає отримання ним візуальної інформації про наявність у контрольованій рейці вказаної несправності.

3.3.1. Зона контролю візуальним методом

Для використання візуального методу контролю під час виконання перевірки укладених у колію рейок операторові не потрібно ніяких додаткових оптичних приладів. При цьому необхідна наявність базових вимірювальних пристроїв - наявності лінійки чи штангенциркулю для контролю параметрів виявлених дефектів (за їх наявності). При цьому із свого робочого місця, не впливаючи на швидкість проведення контролю, оператор може оцінювати лише стан поверхні кочення та пір'їн підшви рейки. Зони, доступні огляду оператора, відмічені червоним кольором на Рис. 3.10.

Негативним фактором використання цього методу є неможливість контролю глибинних дефектів та те, що оператор основну увагу концентрує не на рейці, а на екрані приладу, що проводить контроль – для прикладу це може бути або двонитковий УДС2-73 [29] або однопнитковий УДС2-77 [30].

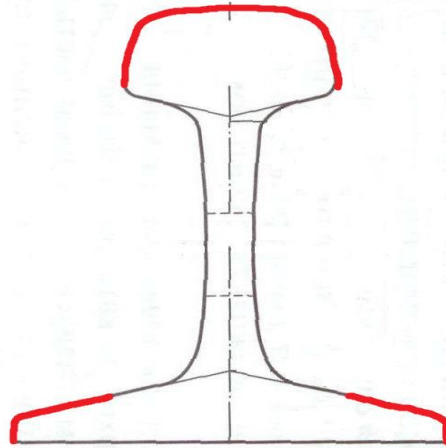


Рис. 3.10. Доступні для огляду фрагменти рейки

3.3.2. Зона контролю ультразвуковим методом

При наведеній же ситуації із рейкою сканер буде встановлено перпендикулярно до неї у точці 2 на рис. 2.1. Зелена трапеція визначає ту зону, в якій проводиться безпосередній контроль. Також варто визначити наявність мертвої зони 1. Таке встановлення контролюючого сканеру дає змогу визначати навіть наявність поздовжніх тріщин у головці рейки, котрі зазвичай ігноруються стандартними датчиками. Відповідно також необхідно не забувати про наявність мертвої зони біля перетворювача, котра буде прямо пропорційною габаритам п'єзоелементу та обернено пропорційна довжині хвилі у матеріалі[31].

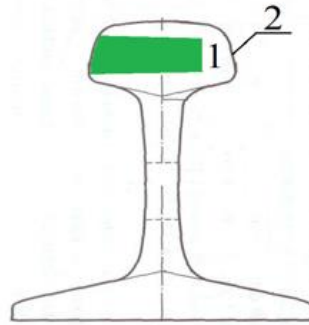


Рис. 3.11 Зона для контролю повздовжніх тріщин у рейці ультразвуковим методом контролю

3.3.3. Зона контролю вихреструмовим методом

При використанні методу вихревих струмів важливо пам'ятати про той факт, що контроль відбувається лише у незначній приповерхневій зоні, у якій і збуджуються вихреві струми. Ця глибина зменшується із ростом частоти сканеру. Тому при контролі рейок зазначений метод не може бути основним і повинен використовуватись разом із іншими, що забезпечать контроль глибинних шарів рейки[31]. При використанні точки встановлення 2 на Рис. 3. зона контролю вихреструмовим методом буде представлена на Рис. 3.12.

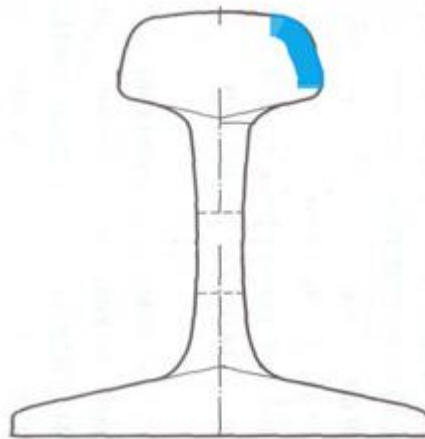


Рис. 3.12 Зона контролю поверхневих дефектів вихреструмовим методом

3.4. Експериментальна перевірка можливості контролю оновлених зон контролю рейки (при нетиповому встановленні датчику)

Дослідним шляхом на базі кафедри Акустичних та мультимедійних електронних систем було оцінено можливість контролю рейки ультразвуковим методом при нестандартному встановленні датчику[32]. Для оцінки можливості проведення сканування було використано рейку, показану на Рис. 3.3.

Використання для контролю таких рейок односторонніх дефектоскопів із двосторонніми опорними катками може призводити до пошкодження цих катків і виходу з ладу ходової частини дефектоскопу. Також варто зазначити, що організація робочого середовища оператора одностороннього дефектоскопу виключає отримання ним візуальної інформації про наявність у контрольованій рейці вказаної несправності.

Для контролю було використано сімейство прямих перетворювачів П111 із частотами від 1.25 до 5 МГц. Прямий перетворювач у наявних на сучасному ринкові приладах УДС2-73[29] та УДС2-77 [30] відповідає за реалізацію ехо-імпульсного та дзеркально-тіньового методів ультразвукового контролю при прямому введенні ультразвуку.

Зважаючи на особливість форми об'єкту контролю варто використовувати незначно видозмінену типову каретку рейкового дефектоскопу [29], [30], котра встановлюється на робочу грань рейки, однак її ширина має відповідати параметрові L на Рис. 3.13. Ширина п'єзоелементу при цьому має відповідати даним із Таблиця 2.6.

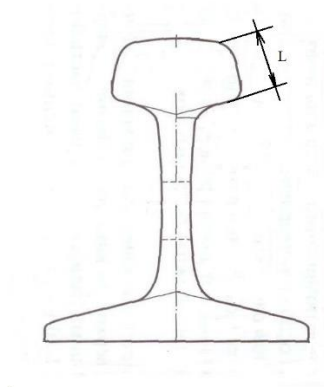


Рис. 3.13. Контрольована рейка

Застосування такої будови сканеру дає змогу як використовувати додаткові вихреструмові сканери для контролю рейки, так і використовуючи мінімум перетворювачів контролювати форму рейки. Приклад ситуації[32] із втратою акустичного контакту представлено на Рис. 3.14



Рис. 3.14 Деформований об'єкт контролю

У випадку втрати акустичного контакту відбувається зникнення сигналу на екрані приладу, а у випадку застосування вихреструмowego датчику (при встановленні його на ту ж саму робочу грань рейки) відбудеться перекося сканеру, що викличе типовий скачок[33] на екрані Рис. 3.15 приладу [34].



Рис. 3.15. Екран вихреструмового дефектоскопу при перекосі сканеру

Типова схема будови однопіткового дефектоскопу представлена на Рис. 3.16 елементами 1 та 2, де 1 – це опорні дворебордні катки, 2 – типова каретка дефектоскопу.

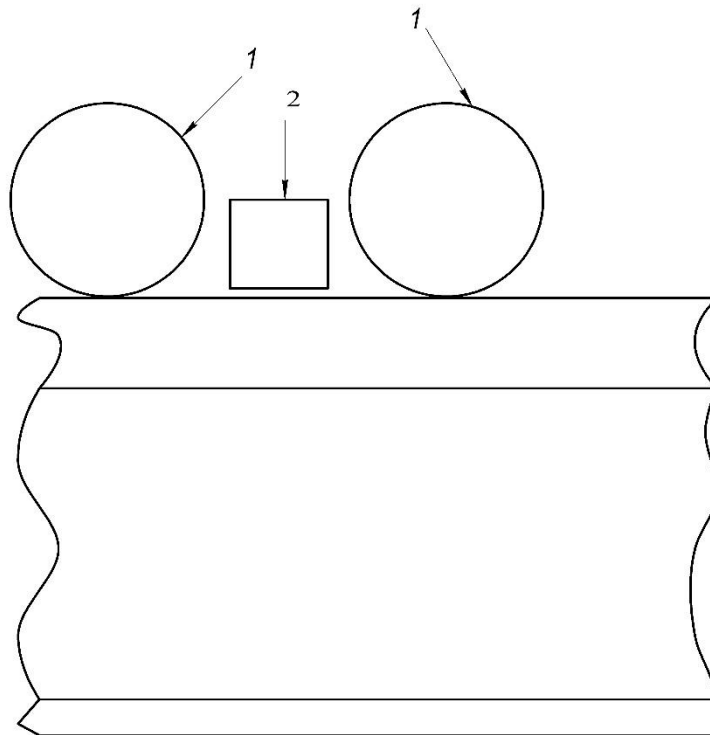


Рис. 3.16 Будова однопіткового перетворювача

Оновлена схема будови дефектоскопу представлена на Рис. 3.17 елементами 1-3, де 3- новий сканер.

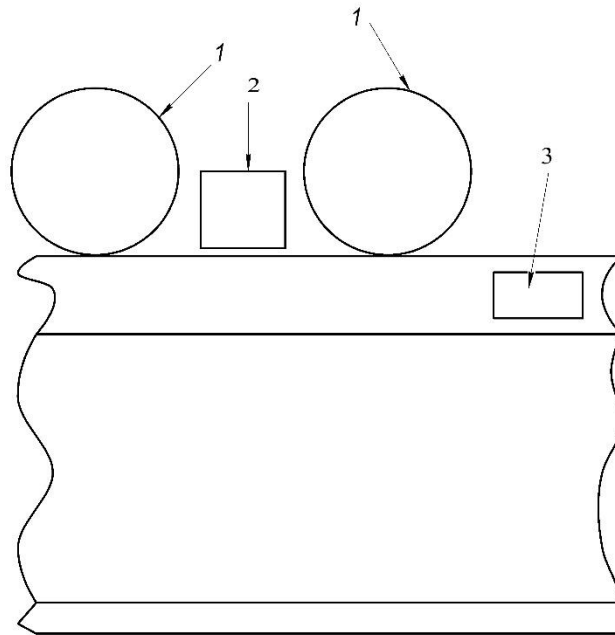


Рис. 3.17 Оновлена схема будови дефектоскопу

3.4.1. Проведення експериментів

Основним інформаційним параметром пропонується вважати фактор спрацювання стробу доного сигналу[32]. У випадку зникнення сигналу у ньому приймається рішення про дефектність об'єкту контролю. На Рис. 3.18 приведено ситуацію наявності сигналу у стробі.

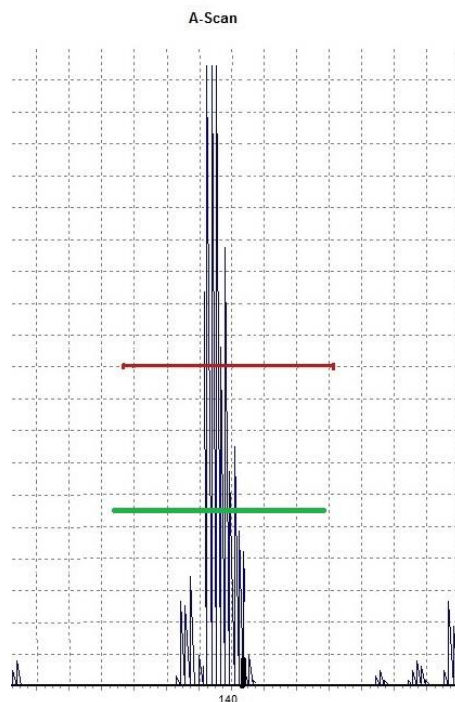


Рис. 3.18 Наявність сигналу (тобто відсутність дефекту)

Огляд зони контролю, її співвідношення із зоною контролю при використанні компліментарних методів контролю – вихреструмового та візуального показано у роботі[31]. Обмежуючим фактором при його використанні є розмір ближньої зони (3.1), котра залежить як від габариту перетворювача (a – радіус випромінюючої пластини) та його частоти ($\lambda_{ок}$ – довжина хвилі у матеріалі об'єкту контролю).[3].

$$r_{бл} = \frac{a^2}{\lambda_{ок}} \quad (3.1)$$

Зважаючи на попередньо наведені фактори, Рис. 3. та посилаючись на джерело[24] можна стверджувати, що встановлення ультразвукового датчика у вказаній точці дасть змогу виявляти дефект, що має класифікаційний індекс 30 В.1-2(ГД) із більшою вірогідністю, ніж забезпечується сучасними приладами.

Окремо необхідно сказати про налаштування зони контролю для приладу. Окрім підсилення мають бути визначені наступні параметри – затримку **h1**, тривалість розгортки **h2**, початок стробу **s1**, протяжність стробу **s2**. При цьому загальна протяжність зони контролю **H1** має перевищувати товщину об'єкту контролю **H** – у даному випадку товщину головки рейки у місці встановлення датчика[32].

Оскільки у даному випадку нас цікавить лише зона у околі донного сигналу, то введемо наступні співвідношення (3.2) та (3.3):

$$H1 \approx 1.1 \cdot H \quad (3.2)$$

$$H1 \approx h1 + h2 \quad (3.3)$$

У приведеному співвідношенні $h1=0,9 H$, і відповідно $h2=0,2 H$. Це відповідає заявленій вимозі щодо відображення лише околу доного сигналу.

Окремо потрібно визначити параметри стробу – його початок та протяжність. Визначається початок непрямо. Для приведеної ситуації його середина має бути розміщена на донному сигналі, тобто на **H**. Протяжність стробу має бути рівною $0.1-0.2 H$ в залежності від типу рейки. Тоді початок стробу визначається як (3.4), а протяжність як (3.5).

$$s1 = H - 0.1 \cdot H \quad (3.4)$$

$$s2 = 0.1 \cdot H \quad (3.5)$$

В залежності від характеру об'єкту контролю параметри зони контролю та стробу можуть бути змінені. Основну увагу при зміні вказаних параметрів потрібно звертати на збереження інформативності відображуваної променевої картини та відсутності у робочому полі зайвих сигналів.

Під час проведення дослідів було виконано серію із 50 вимірювань – по 10 на кожен із 5 застосовуваних датчиків. Товщина рейки у точці встановлення складала 71 мм. Список датчиків, що було застосовано, наступний:

1. П111-1,25-К20-003 №624.
2. П111-2,5-К12-004 №1001
3. П111-2,5-К12-004 №894
4. П111-5-К6-004 №420
5. П111-5-К6-004 №424

Експериментальним чином було встановлено, що датчики із частотою 10 МГц не можна використовувати для проведення контролю, оскільки через затухання у рейці відсутній відбитий сигнал.

Попереднє калібрування приладу УДЗ-71[35] було виконано на стандартному зразку СОЗ-Р[36] для кожного із перетворювачів.

Після цього проводилось вимірювання на 10 різних точках рейки Р-50 у 10 різних точках робочої грані головки рейки, де вимірювались умовні значення підсилення, що досягається при перетині донним сигналом рівня 50% висоти екрану та товщина головки рейки (її глибина).

3.4.2. Статистичний аналіз отриманих результатів

Статистичний аналіз було проведено у декілька етапів. Перший етап полягав у узагальненні і групуванні отриманих результатів, другий у визначенні відповідності нормальному закону розподілу результатів у отриманих групах,

третій у підборі методів, що застосовуються для аналізу (параметричні[37] або непараметричні[38] тести) та їх використанні[32].

Частина результатів виконання першого етапу представлено у Таблиця 3.1.

Можливість використання вибірок малого розміру показано на прикладі сигналів електроенцефалограм у роботі[39].

Таблиця 3.1 Отримані результати

Назва та номер перетворювача	Чутливість, дБ	Виміряна глибина, мм
П111-2,5-К12-004 №1001	62	71,04
	53	71,04
	59	71,15
	55	70,89
	57	70,97
	57	70,93
	52	70,97
	52	70,59
	52	70,9
	58	70,82

Після цього було встановлено відповідність розподілу результатів у групах даних нормальному закону із використанням графічного методу та тесту Шапіро-Вілка[40], що показано на Рис. 3.19. Необхідно зазначити, що для усіх груп було підтверджено гіпотезу про нормальний розподіл результатів.

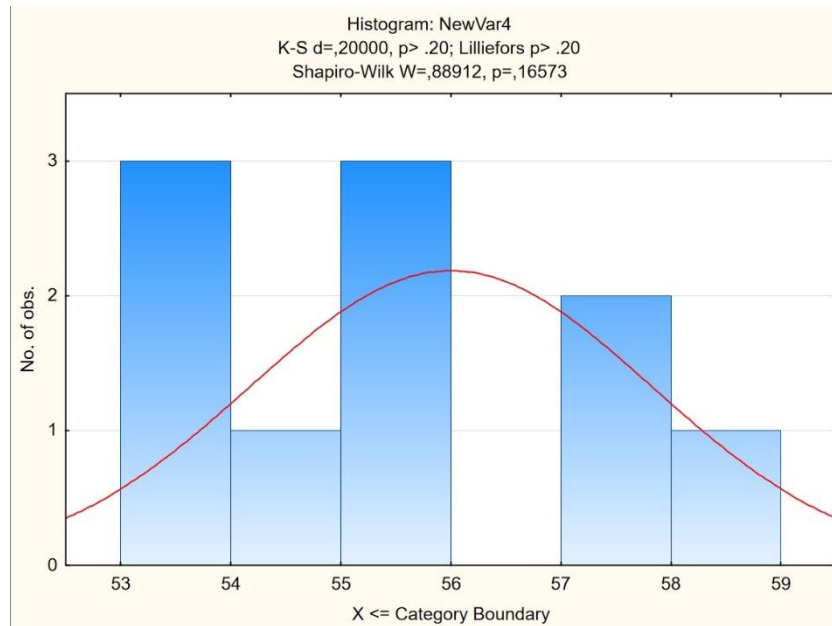


Рис. 3.19. Аналіз відповідності розподілу результатів у групі нормальному
законові розподілу

Далі було виконано статистичний аналіз, використовуючи t -критерій Стьюдента для вибірок із нормальним розподілом результатів[41]. При цьому статистичний параметр p було обрано рівним 0,05, відповідно до принципів, приведених у роботі[42]. Статистичне порівняння було проведено для двох великих груп результатів (порівняння між групами результатів різної частоти та порівняння між різними датчиками однієї частоти. Докладне описання особливостей виконання статистичного аналізу приведено у роботі[43].

Порівняння результатів між різними частотами показує для вимірних значень глибини наявність статистично значимих розбіжностей між отриманими результатами для усіх досліджуваних частот, що використовуються приведеними ПЕП (Таблиця 3.2).

Таблиця 3.2 Порівняння результатів вимірювання глибини для різних частот

Variable	T-tests: Group 1: 1,25 Group 2: 2,5				
	Mean 1	Mean 2	t-value	df	p
1.25 МГц and 2.5 МГц, мм	70,04	70,84	-10,01	28	0,00

В той самий час різниці у вимірних значеннях глибини для різних датчиків, що використовують одну частоту, виявлено не було (Таблиця 3.3).

Таблиця 3.3 Порівняння результатів вимірювання глибини для різних датчиків однієї частоти

Variable	T-tests: Group 1: 1081 Group 2: 894				
	Mean 1	Mean 2	t-value	df	p
2.5 МГц, мм	70,93	70,76	1,64	18	0,12

Порівняння результатів між різними частотами показує для вимірних значень підсилення наявність статистично значимих розбіжностей між отриманими результатами для частот в 1,25 МГц та 5 МГц та 2,5 МГц та 5 МГц (Таблиця 3.4).

Таблиця 3.4 Порівняння результатів встановлення рівня підсилення для частот 2,5 та 5 МГц

Variable	T-tests: Group 1: 2,5 Group 2: 5				
	Mean 1	Mean 2	t-value	df	p
2,5 МГц and 5 МГц, дБ	55,85	71,1	-15,97	38	0,00

Варто окремо зазначити, що для різних датчиків, що працюють на частоті 2,5 МГц статистично значимі розбіжності відсутні для вимірних значень підсилення (Таблиця 3.5).

Таблиця 3.5 Порівняння результатів встановлення рівня підсилення для різних датчиків однієї частоти

Variable	T-tests: Group 1: 1081 Group 2: 894				
	Mean 1	Mean 2	t-value	df	p
2.5 МГц, дБ	55,7	56,0	-0,24	18	0,81

Графічно приведено ситуацію відображено на Рис. 3.20. Із наведеного рисунку видно, що хоча середні значення для обох вибірок близькі, для одного із перетворювачів розкид отриманих значень був значно більшим.

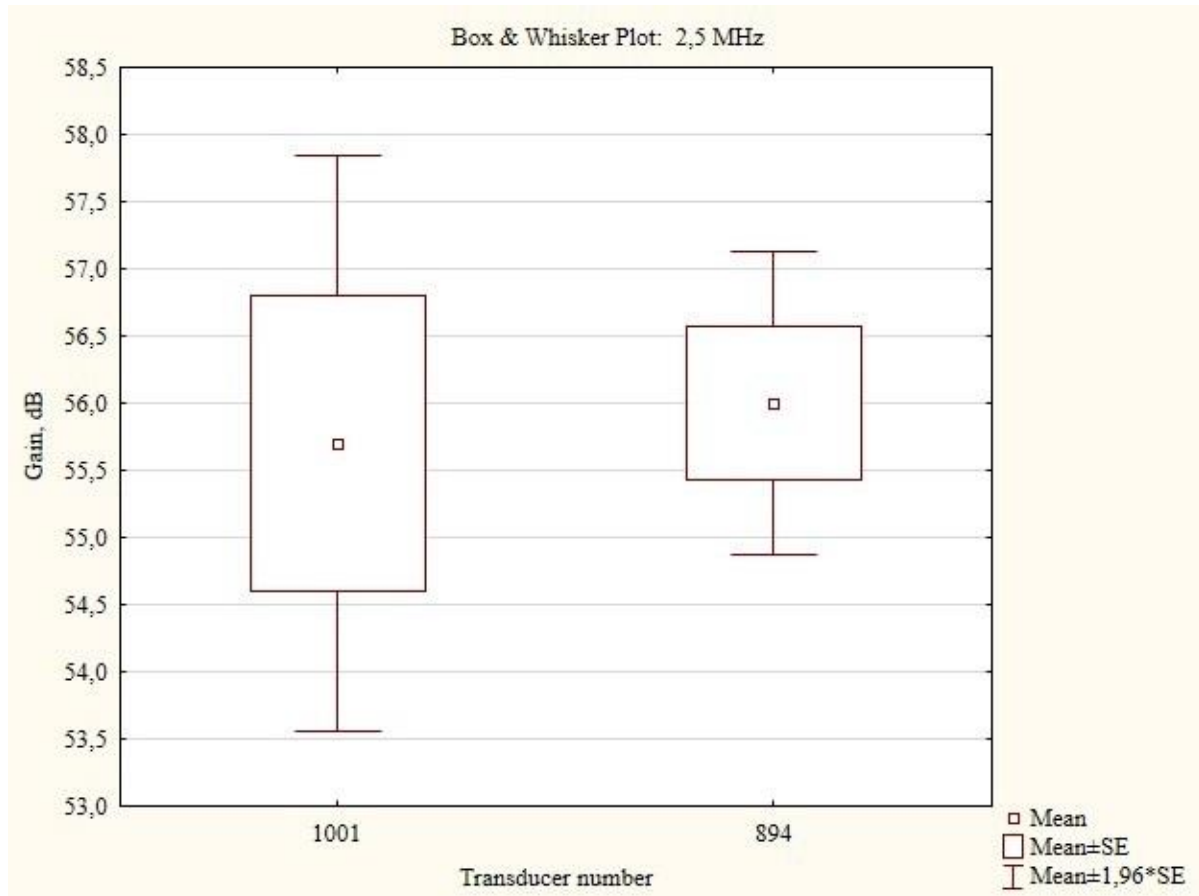


Рис. 3.20 Значення підсилення для різних датчиків, що працюють на частоті 2,5 МГц

Для датчиків, що працюють на частоті 5 МГц статистично значимі розбіжності були виявлені для виміряних значень підсилення (Таблиця 3.6).

Таблиця 3.6 Порівняння результатів встановлення рівня підсилення для різних датчиків однієї частоти при наявності між ними статистично значимої різниці

Variable	T-tests: Group 1: 424 Group 2: 420				
	Mean 1	Mean 2	t-value	df	p
5 МГц, дБ	73,1	69,1	3,36	18	0,0035

Графічно результати досліджень показано на Рис. 3.21. У даному випадку відрізняються якраз середні значення, хоча розкид значень був приблизно однаковим.

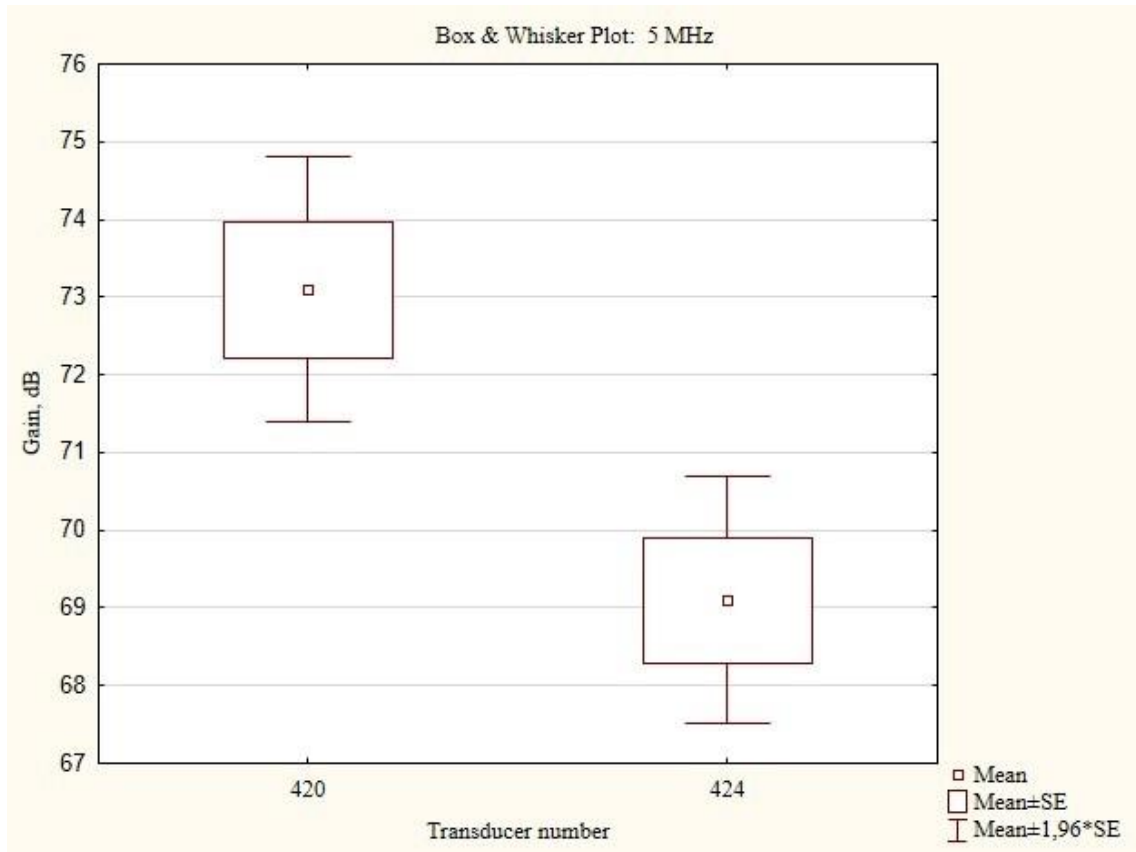


Рис. 3.21 Значення підсилення для різних датчиків, що працюють на частоті 5 МГц

У приведеному розділі проаналізовано можливість використання акустичних перетворювачів із нестандартним місцем встановлення (робоча або неробоча грань рейки) для контролю рейок у складі наявних на сучасному ринкові рейкових дефектоскопів. Додатково розглянуто можливість використання у якості комплементарних до вказаних ультразвукових перетворювачів вихреструмових приладів.

3.5. Ультразвуковий контроль на великих швидкостях

Швидкість понад 60 км/год дуже близька до фізичного ліміту для ультразвукового методу контролю. Максимальна частота повторення імпульсів обмежена швидкістю звуку в рейці. Це в основному впливає на бічну роздільну здатність ультразвукових вимірювань. Виявленість дефектів зменшується зі збільшенням швидкості. Це показано на Рис. 3.22, де зображено кількість виявлення типових дефектів рейок у залежності від швидкості поїзда за допомогою ультразвукового пристрою працюючого з частотою повторення 5 кГц. Ці дослідження були проведені на зразках з більш ніж 80 контрольними дефектами[26].

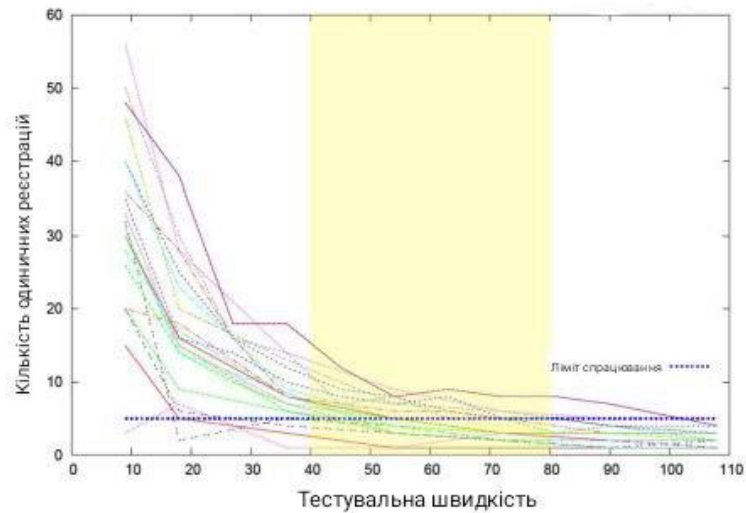


Рис. 3.22 Кількість вдалих знаходжень дефектів відносно швидкості контролю

3.6. Висновок до розділу III

Комбінований метод це дуже продуктивне рішення для контролю рейки. Ультразвуковий метод дозволяє контролювати значну частину головки рейки а також шийку, все залежить від розташування датчиків і від вибору кута, а вихрострумний метод дозволяє частково перекривати недоліки ближньої зони, а також головна функція це контроль поверхні рейки. Працюючи у тандемі можуть бути виявлені усі види і розміри дефектів усередині (якщо вони розташовані так, що закривають значну частину уз променю) завдяки ультразвуку, а також усі несущальності назовні (ті які розташовані перпендикулярно до вихрових токів мають найкращу розпізнаваність).

Також результатом проведення експериментів було використання у якості інформаційних параметрів значення підсилення та товщина (глибина) головки рейки. Діапазон отриманих значень підсилення мав мінімальне значення 52 дБ а максимальне – 77 дБ, при цьому спостерігався ріст значення підсилення при використанні перетворювача частотою 5 МГц.

Отримані чисельні значення експериментів було оцінено шляхом встановлення відповідності розподілу у тестових групах нормальному закону і з використанням методу Шапіро-Вілка та графічного аналізу, із подальшим статистичним аналізом із використанням параметричного методу - t-критерію Стьюдента.

Проведений аналіз показав можливість отримання бажаних результатів (а саме сигналу від протилежної сторони головки рейки) та використання такого встановлення сканеру для виявлення дефектів із індексом 30В.1-2(ГД).

Окрім того під час проведення аналізу було відмічено наявність статистично значущої різниці між виміряними значеннями товщини головки рейки при використанні датчиків різних частот, при цьому ця різниця відсутня для різних датчиків однієї частоти.

При аналізі отриманих значень підсилення було виявлено наявність статистично значимої різниці між датчиками частотою 5 МГц та датчиками

інших частот (1,25 МГц та 2,5 МГц). В той самий час для датчиків частотою 5 МГц спостерігається наявність статистично значимої різниці при зміні датчика (для датчика П111-5-К6-004 №420 середнє у групі значення підсилення склало 69,1 дБ, для перетворювача П111-5-К6-004 №424 значення підсилення склало 73,1 дБ), чого не спостерігалось для датчиків інших частот. Можливою причиною цього є малий діаметр контактної зони перетворювача.

Розділ 4

Вибір будови скануючого пристрою

4.1. Розгляд можливості реалізації скануючого пристрою

Незалежно від того, чи є ультразвуковий датчик роздільно-суміщеним, роздільним або суміщеним, для проведення механізованого контролю необхідно встановити його у сканер.

Цим сканером може бути як типова лижа, так і іммерсійне ролесо. При цьому необхідно зважати на фізичну можливість розміщення сканеру на об'єкті контролю. Зважаючи на запис [44] та зображення Рис. 4.1 можна побачити, що у будові рейкового полотна є багато елементів, що можуть пошкодити скануючий прилад за умови його встановлення на боковій грані рейки.



Рис. 4.1 Додаткові елементи колії

Особливо це актуально для іммерсійного колеса, тому також необхідно враховувати можливість використання класичної лижі за умови її встановлення на бокову грань рейки. Варто зазначити, що саме це визначає максимальний

значущий габарит – а саме товщину скануючого приладу (лижі), що має не перевищувати 10 мм.

Цей факт не дає використовувати при використанні спеціалізованого скануючого пристрою роздільно-суміщених датчиків через наявність у їх будові призми[3]. Також навіть його використання все одно є неможливим на деяких ділянках колії (перехрестні колії, елементи стрілочних переводів, переїзди).

Варто зазначити, що у подальшому буде розглянуто роботу лише прямого датчика ультразвукового контролю, оскільки саме датчики такого типу були використані у експериментах, котрі встановили можливість проведення контролю рейки при встановленні скануючого пристрою на бокову грань головки. Датчики такого ж типу будуть використані при розгляді іммерсійного колеса.

Тому важливо розглянути також використання типових датчиків, з яких можна зібрати скануючий прилад, характеристики якого аналогічні наразі застосовуваним. Для цього будуть використані сканери із списку, що було приведено у розділі із експериментами.

Також ідентичний скануючий пристрій буде використано для закріплення у ньому вихреструмівих датчиків.

Саме ж іммерсійне колесо являє собою шину із полімеру, що заповнена придатною до використання у конкретних кліматичних умовах іммерсійною рідиною, у котру зсередини колеса вводяться ультразвукові коливання. Вигляд комерційного варіанту колеса із стандартним встановленням на рейці приведено на Рис. 4.2.

Усі розглянуті у подальшому сканери можуть бути використані лише на лінійних ділянках колії.

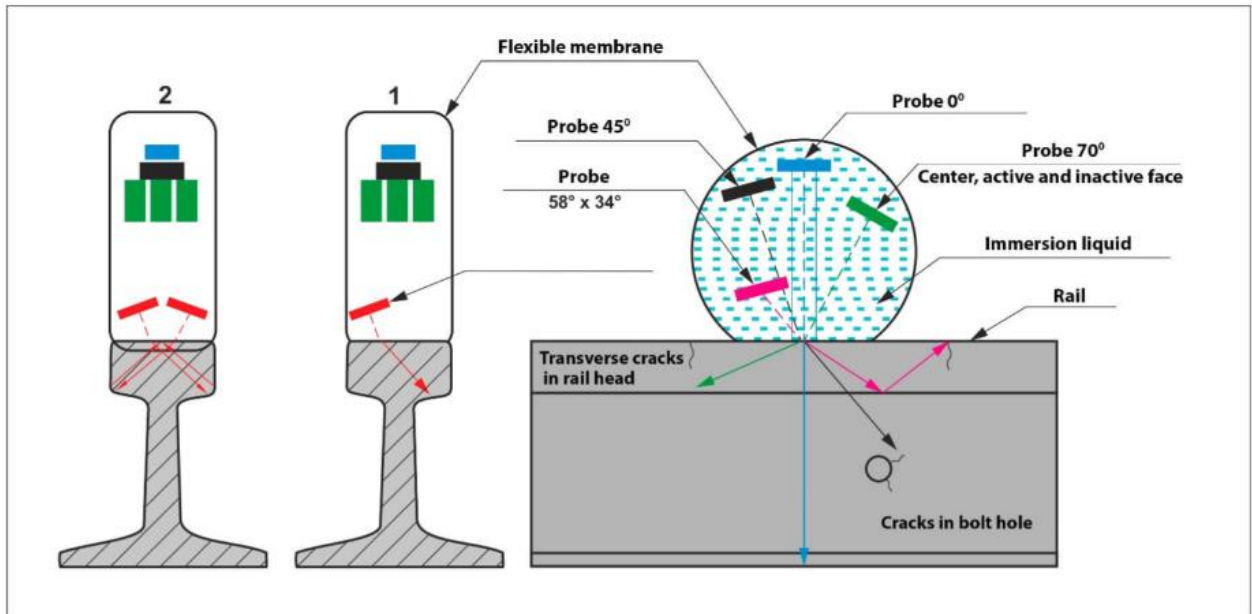


Рис. 4.2 Будова комерційного колеса

Можна звернути увагу на наявність великої кількості каналів із похилими п'єзоперетворювачами, однак для конструкції колеса із використанням нестандартного місця встановлення вони розглянуті не будуть, а тому пропонується будова колеса матиме вигляд, як на Рис. 4.3, де 1- це п'єзоелектричний перетворювач (ПЕП), 2 - іммерсійна рідина, 3 – саме колесо, 4 – хід променів, 5 – об'єкт контролю

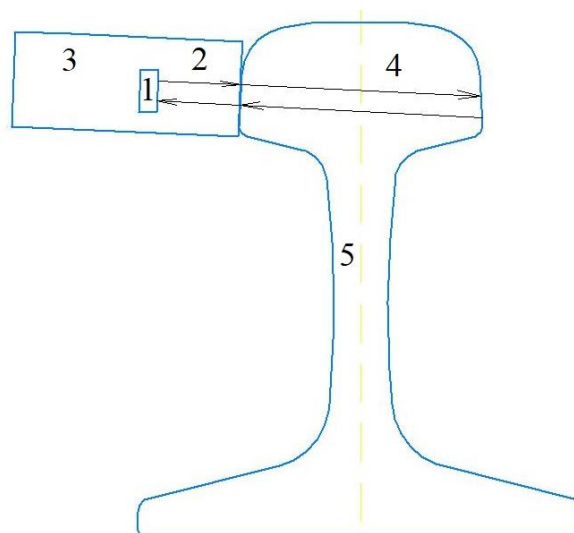


Рис. 4.3 Будова пропонуваного колеса та його місце встановлення

Конструкція сканера класичного вигляду представлена на Рис. 4.4. Необхідно вказати, що робота із робочої грані рейки ускладнена не тільки її формою, а й самою поверхнею.

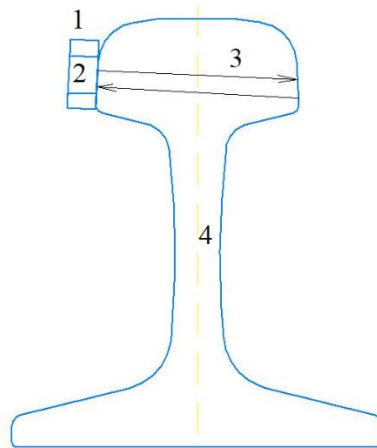


Рис. 4.4 Будова пропонованого класичного сканеру та його місце встановлення

Її шорсткість може значно перевищувати рекомендовані параметри для ультразвукових датчиків, а тому потрібно або використовувати більшу кількість контактної рідини, або доповнити конструкцію сканеру додатковим протектором або використовувати інший тип сканеру. Тому буде пріоритетно розглянуто саме іммерсивне колесо.

4.2. Розрахунок скануючого колеса

Відповідно до джерел проведемо розрахунок будови та деяких особливостей роботи іммерсійного колеса відповідно до джерел [3] та [45].

4.2.1. Розрахунок по класичному принципіві будови колеса

Коефіцієнт проходження ультразвуку можна знайти за формулою по різним за характеристиками матеріалам:

$$K_{nm} = \frac{2 Z_m}{Z_n + Z_m} \quad (4.1)$$

Індекс n позначає середовище з якого падає хвиля, а індекс m – середовище куди вона проходить. Z_n, Z_m – питомі акустичні імпеданси суміжних середовищ. Акустичний імпеданс визначається або за формулою (1.5), або за допомогою табличних даних Таблиця 4.1.

Акустичний імпеданс для деяких матеріалів:

1. П'єзопластина складається із п'єзокераміки:

Таблиця 4.1 Деякі параметри п'єзокераміки

Матеріал	Швидкість звуку $C, 10^3$ м/с	Густина $\rho,$ 10^3 кг/м ³	Характеристичний імпульс $z,$ 10^6 Па·с/м	Відносна діелектрична проникність, ϵ	Електрична міцність $E_{max},$ 10^3 В/мм	П'єзомодуль $d_{31},$ 10^{-12} Кл/Н	Коефіцієнт електро механічного зв'язку, K_p	Температура Кюрі, °С	Механічна добротність, Q
П'єзокераміка вітчизняного (або країн ближнього зарубіжжя) виробництва									
ЦТС-19	3,3±0,3	7,4-7,5	22-27	1750±200	3,0	330-350	0,45-0,6	>290	80
ЦТС-23	3,0-3,3	7,4-7,6	22,2-25,0	1050±150	3,0	200-240	0,45-0,5	280	300
ЦТС-36	3,0-3,3	7,7	-	670	-	220	0,57	350	80
ЦТССг-1	3,5	7,3	24,5	1000±150	-	180	0,43	260	500
ТКС-21 (РСТ-21)	4,96-5,16	7,0	-	390-440	7,0	90-100	0,13-0,16	200-220	100-200
П'єзокераміка виробництва США									
PZT-2	3,36	7,6	-	990	0,8	152	0,47	370	680
PZT-4	4,6	7,5	-	1300	-	389	0,58	328	500
PZT-5Н	2,85	7,5	-	3400	0,6	593	0,65	193	65
PZT-8	3,39	7,6	-	1000	0,9	218	0,5	300	1000
П'єзокераміка виробництва Німеччини									
PXE-1	-	5,7	-	900	-	85	0,28	130	1000
PXE-4	-	7,65	-	1500	0,77	265	0,55	300	500
PXE-5	-	7,6	-	1750	0,65	365	0,62	285	80
П'єзополімерна плівка									
ПВДФ	1,5-2,5	1,3-1,8	2,0-4,5	11-13	-	25	0,1-0,14	150	-

- Етиленгліколь $2,42 \times 10^6$ Па·с/м у якості контактної рідини було обрано через його властивості – а саме морозостійкість та малий дрейф швидкості звуку під дією температурних факторів.
- Поліуретан $1,8 \times 10^6$ Па·с/м у якості шини слугує для забезпечення міцності будови конструкції.
- У якості контактної рідини може бути використана або вода $1,48 \times 10^6$ Па·с/м, або спирт $0,94 \times 10^6$ Па·с/м, або гліцерин $2,42 \times 10^6$ Па·с/м.
- Матеріаль ОК - сталь $46,7 \times 10^6$ Па·с/м.

Нижче приведено розрахунки коефіцієнту проходження ультразвуку з матеріалу п'єзопластини у іммерсійну рідину і у зворотню сторону.

ЦТС – 19 → етиленгліколь

$$Z_m \approx 24,75 \times 10^6 \text{ Па·с/м}$$

$$Z_n \approx 24,75 \times 10^6 \text{ Па·с/м}$$

$$K_{nm} = \frac{2 Z_m}{Z_n + Z_m} = 0,18$$

$$K_{nm} = \frac{2 Z_m}{Z_n + Z_m} = 1,82$$

Результат проходження у обидві сторони:

Етиленгліколь → ЦТС – 19

$$K_{\text{рез}} = 0,33$$

ЦТС – 23 → этиленгліколь

$$Z_n \approx 22,5 \times 10^6 \text{ Па} \cdot \text{с/м}$$

$$K_{nm} = \frac{2 Z_m}{Z_n + Z_m} = 0,19$$

Этиленгліколь → ЦТС – 23

$$Z_m \approx 22,5 \times 10^6 \text{ Па} \cdot \text{с/м}$$

$$K_{nm} = \frac{2 Z_m}{Z_n + Z_m} = 1,8$$

Результат

$$K_{\text{рез}} = 0,34$$

ЦТС – 36 → этиленгліколь

$$Z_n \approx 23,1 \times 10^6 \text{ Па} \cdot \text{с/м}$$

$$K_{nm} = \frac{2 Z_m}{Z_n + Z_m} = 0,189$$

Этиленгліколь → ЦТС – 36

$$Z_m \approx 23,1 \times 10^6 \text{ Па} \cdot \text{с/м}$$

$$K_{nm} = \frac{2 Z_m}{Z_n + Z_m} = 1,81$$

Результат

$$K_{\text{рез}} = 0,34$$

ЦТССТ– 1 → этиленгліколь

$$Z_n \approx 25,55 \times 10^6 \text{ Па} \cdot \text{с/м}$$

$$K_{nm} = \frac{2 Z_m}{Z_n + Z_m} = 0,17$$

Этиленгліколь → ЦТССТ– 1

$$Z_m \approx 25,55 \times 10^6 \text{ Па} \cdot \text{с/м}$$

$$K_{nm} = \frac{2 Z_m}{Z_n + Z_m} = 1,82$$

Результат

$$K_{\text{рез}} = 0,31$$

ТКС – 21 (РСТ - 21) →

этиленгліколь

$$Z_n \approx 34,72 \times 10^6 \text{ Па} \cdot \text{с/м}$$

$$K_{nm} = \frac{2 Z_m}{Z_n + Z_m} = 0,13$$

Этиленгліколь →

ТКС – 21 (РСТ - 21)

$$Z_m \approx 34,72 \times 10^6 \text{ Па} \cdot \text{с/м}$$

$$K_{nm} = \frac{2 Z_m}{Z_n + Z_m} = 1,87$$

Результат

$$K_{\text{рез}} = 0,24$$

РЗТ – 2 → этиленгліколь

$$Z_n \approx 25,53 \times 10^6 \text{ Па}\cdot\text{с/м}$$

$$K_{nm} = \frac{2 Z_m}{Z_n + Z_m} = 0,173$$

Етиленгліколь → PZT – 2

$$Z_m \approx 25,53 \times 10^6 \text{ Па}\cdot\text{с/м}$$

$$K_{nm} = \frac{2 Z_m}{Z_n + Z_m} = 1,82$$

Результат

$$K_{\text{рез}} = 0,31$$

PZT – 4 → етиленгліколь

$$Z_n \approx 34,5 \times 10^6 \text{ Па}\cdot\text{с/м}$$

$$K_{nm} = \frac{2 Z_m}{Z_n + Z_m} = 0,131$$

Етиленгліколь → PZT – 4

$$Z_m \approx 34,5 \times 10^6 \text{ Па}\cdot\text{с/м}$$

$$K_{nm} = \frac{2 Z_m}{Z_n + Z_m} = 1,86$$

Результат

$$K_{\text{рез}} = 0,24$$

PZT – 5H → етиленгліколь

$$Z_n \approx 21,375 \times 10^6 \text{ Па}\cdot\text{с/м}$$

$$K_{nm} = \frac{2 Z_m}{Z_n + Z_m} = 0,203$$

Етиленгліколь → PZT – 5H

$$Z_m \approx 21,375 \times 10^6 \text{ Па}\cdot\text{с/м}$$

$$K_{nm} = \frac{2 Z_m}{Z_n + Z_m} = 1,79$$

Результат

$$K_{\text{рез}} = 0,36$$

PZT – 8 → етиленгліколь

$$Z_n \approx 25,76 \times 10^6 \text{ Па}\cdot\text{с/м}$$

$$K_{nm} = \frac{2 Z_m}{Z_n + Z_m} = 0,171$$

Етиленгліколь → PZT – 8

$$Z_m \approx 25,76 \times 10^6 \text{ Па}\cdot\text{с/м}$$

$$K_{nm} = \frac{2 Z_m}{Z_n + Z_m} = 1,82$$

Результат

$$K_{\text{рез}} = 0,31$$

ПВДФ → етиленгліколь

$$Z_n \approx 3 \times 10^6 \text{ Па}\cdot\text{с/м}$$

$$K_{nm} = \frac{2 Z_m}{Z_n + Z_m} = 0,89$$

Етиленгліколь → ПВДФ

$$Z_m \approx 3 \times 10^6 \text{ Па} \cdot \text{с/м}$$

$$K_{nm} = \frac{2 Z_m}{Z_n + Z_m} = 1,107$$

Результат

$$K_{\text{рез}} = 0,985$$

Враховуючи отримані коефіцієнти проходження, можна припустити, що кращим варіантом буде п'єзокераміка з США PZT – 5Н (не враховуючи п'єзокерамічну плівку ПВДФ) з коефіцієнтом проходження у обидві сторони 0,36. Далі для розрахунків буде використано п'єзокераміка PZT – 5Н, її параметри – імпеданс $Z_m \approx 21,375 \times 10^6$ Па·с/м, швидкість розповсюдження у ній хвиль – 2850 м/с, густина – 7500 кг/м³.

Тоді товщина п'єзопластини становитиме:

$$h = \frac{C_{\text{ПЕП}}}{2f} \quad (4.2)$$

З приведеної формули випливає (за умови використання частоти в 1.25 МГц для контролю кранових рейок), що товщина п'єзопластини має бути рівною 1,14 мм.

Діаметр п'єзопластини буде обрано таким, щоб залишити ближню зону повністю у іммерсійній рідині та виконати умову, показану у Таблиця 2.6. Зважаючи на той факт, що для забезпечення акустичного контакту колесо має бути притиснене до рейки, можна обрати діаметр п'єзопластини рівним 16 мм. Це дасть розмір ближньої зони у ній рівним 28 мм., що дасть змогу віддалити ПЕП від шини на 30 мм. Розрахунок проводився відповідно до формули 3.1.

Додатково визначимо мінімальну та максимальну допустиму товщини іммерсійної рідини. Мінімальна допустима товщина визначається розміром мертвої зони у середовищі і за умови використання зондуючого імпульсу із трьома періодами власних резонансних коливань складе 1,99 мм. Розраховується вона ж за формулою 4.3, де $\tau=3T$.

$$r = \frac{C_p \cdot \tau}{2} \quad (4.3)$$

Максимальна ж товщина визначається такою, що не викликає ослаблення сигналу більше ніж на 10 дБ під час його проходження по ній. Для частоти в 1.25 МГц вона відповідно до становить 1,63 дБ/м, тобто має бути менше 6 метрів 13 сантиметрів. Як ми бачимо, можна використовувати товщину шару іммерсійної рідини у 30 мм.

Також знаючи, що інтенсивність сигналу у ОК впаде у 100 разів відповідно до [45] за 0,39 мс оберемо період слідування рівним 0,5 мс.

Далі вирахуємо коефіцієнт проходження ультразвуку через границю етиленгліколь → поліуритан і назад.

Етиленгліколь → поліуритан

$$Z_n \approx 2,42 \times 10^6$$

$$Z_m \approx 1,8 \times 10^6$$

$$K_{nm} = \frac{2 Z_m}{Z_n + Z_m} = 0,85$$

Поліуретан → етиленгліколь

$$Z_n \approx 1,8 \times 10^6$$

$$Z_m \approx 2,42 \times 10^6$$

$$K_{nm} = \frac{2 Z_m}{Z_n + Z_m} = 1,14$$

Таким чином результуючий коефіцієнт становитиме $K_{рез} = 0,969$.

Після цього необхідно вибрати контактну рідину. Для початку встановимо коефіцієнт проходження із поліуретану у неї і у зворотньому напрямку. Необхідно також зважати на те, що шар рідини є узгоджувачим шаром, а тому його імпеданс не може бути більшим за імпеданс поліуретану відповідно до [3].

Поліуретан має імпеданс рівним $1,8 \times 10^6$ Па·с/м, в той час як вода 1.48×10^6 Па·с/м, спирт 0.94×10^6 Па·с/м, мінеральне масло 1.19×10^6 Па·с/м, оливкове масло 1.32×10^6 Па·с/м, машинне масло 1.51×10^6 Па·с/м, силіконове масло $0,74 \times 10^6$ Па·с/м, трансформаторне масло 1.28×10^6 Па·с/м.

Поліуретан → вода

$$Z_n \approx 1,8 \times 10^6$$

$$Z_m \approx 1,48 \times 10^6$$

$$K_{nm} = \frac{2 Z_m}{Z_n + Z_m} = 0,9$$

Вода → поліуретан

$$Z_n \approx 1,48 \times 10^6$$

$$Z_m \approx 1,8 \times 10^6$$

$$K_{nm} = \frac{2 Z_m}{Z_n + Z_m} = 1,09$$

Результат проходження у обидві сторони:

$$K_{рез} = 0,981$$

Поліуретан → спирт

$$Z_n \approx 1,8 \times 10^6$$

$$Z_m \approx 0,94 \times 10^6$$

$$K_{nm} = \frac{2 Z_m}{Z_n + Z_m} = 0,69$$

Спирт → поліуретан

$$Z_n \approx 0,94 \times 10^6$$

$$Z_m \approx 1,8 \times 10^6$$

$$K_{nm} = \frac{2 Z_m}{Z_n + Z_m} = 1,31$$

Результат проходження у обидві сторони:

$$K_{рез} = 0,9$$

Поліуретан → мінеральне масло

$$Z_n \approx 1,8 \times 10^6$$

$$Z_m \approx 1.19 \times 10^6$$

$$K_{nm} = \frac{2 Z_m}{Z_n + Z_m} = 0,79$$

Мінеральне масло → поліуретан

$$Z_n \approx 1.19 \times 10^6$$

$$Z_m \approx 1,8 \times 10^6$$

$$K_{nm} = \frac{2 Z_m}{Z_n + Z_m} = 1,2$$

Результат проходження у обидві сторони:

$$K_{рез} = 0,948$$

Поліуретан → оливкове масло

$$Z_n \approx 1,8 \times 10^6$$

$$Z_m \approx 1.32 \times 10^6$$

$$K_{nm} = \frac{2 Z_m}{Z_n + Z_m} = 0,84$$

Оливкове масло → поліуретан

$$Z_n \approx 1.32 \times 10^6$$

$$Z_m \approx 1,8 \times 10^6$$

$$K_{nm} = \frac{2 Z_m}{Z_n + Z_m} = 1,15$$

Результат проходження у обидві сторони:

$$K_{рез} = 0,948$$

Поліуретан → машинне масло

$$Z_n \approx 1,8 \times 10^6$$

$$Z_m \approx 1.51 \times 10^6$$

$$K_{nm} = \frac{2 Z_m}{Z_n + Z_m} = 0,91$$

Машинне масло → поліуретан

$$Z_n \approx 1.51 \times 10^6$$

$$Z_m \approx 1,8 \times 10^6$$

$$K_{nm} = \frac{2 Z_m}{Z_n + Z_m} = 1,08$$

Результат проходження у обидві сторони:

$$K_{рез} = 0,98$$

Поліуретан → силіконове масло

$$Z_n \approx 1,8 \times 10^6$$

$$Z_m \approx 0,74 \times 10^6$$

$$K_{nm} = \frac{2 Z_m}{Z_n + Z_m} = 0,58$$

Силіконове масло → поліуретан

$$Z_n \approx 0,74 \times 10^6$$

$$Z_m \approx 1,8 \times 10^6$$

$$K_{nm} = \frac{2 Z_m}{Z_n + Z_m} = 1,41$$

Результат проходження у обидві сторони:

$$K_{рез} = 0,82$$

Поліуретан → масло трансформаторне

$$Z_n \approx 1,8 \times 10^6$$

$$Z_m \approx 1.28 \times 10^6$$

$$K_{nm} = \frac{2 Z_m}{Z_n + Z_m} = 0,83$$

Трансформаторне масло → поліуретан

$$Z_n \approx 1.28 \times 10^6$$

$$Z_m \approx 1,8 \times 10^6$$

$$K_{nm} = \frac{2 Z_m}{Z_n + Z_m} = 1,16$$

Результат проходження у обидві сторони:

$$K_{рез} = 0,96$$

Найкращим варіантом контактної рідини виступає машинне масло з найкращим коефіцієнтом проходження ультразвуку в обидві сторони рівним 0.98.

Тепер розрахуємо коефіцієнт проходження з середовища машинне масло у сталь і назад.

Машинне масло → сталь

$$Z_n \approx 1.51 \times 10^6$$

$$Z_m \approx 46,7 \times 10^6$$

$$K_{nm} = \frac{2 Z_m}{Z_n + Z_m} = 1,93$$

Сталь → машинне масло

$$Z_n \approx 46,7 \times 10^6$$

$$Z_m \approx 1.51 \times 10^6$$

$$K_{nm} = \frac{2 Z_m}{Z_n + Z_m} = 0,06$$

Результат проходження у обидві сторони:

$$K_{рез} = 0,12$$

Таким чином результуючий коефіцієнт проходження становитиме добуток усіх знайдених коефіцієнтів і складатиме: $K_{рез} = 0,04$.

Далі необхідно визначити втрати на проходження по матеріалу іммерсійної рідини та ОК.

Для іммерсійної рідини це складатиме відповідно до [45] по формулі 4.4:

$$K_{\text{мат}} = e^{-2ah} \quad (4.4)$$

Для етиленгліколю цей коефіцієнт становитиме 0,975.

Далі розрахуємо цей самий коефіцієнт для рейки широкої колії Р50 та рейки кранової КР70, скориставшись матеріалами з Рис. 2.3. Тобто для сталі рейки широкої колії візьмемо найменший розмір зерна і коефіцієнт загасання рівним 0,1143 Нп/м, для кранової рейки розмір зерна найбільший і коефіцієнт загасання 2 Нп/м. Тоді для нетипового місця встановлення для рейки широкої колії даний коефіцієнт становитиме 0.98, для кранової рейки 0.74.

Для забезпечення можливості використання стандартного місця встановлення розглянемо і коефіцієнти для нього. Для рейки широкої колії даний коефіцієнт становитиме 0.965, для кранової рейки 0.61.

Також розглянемо поправку на розходження фронту хвилі у матеріалі. Для цього необхідно визначити зовнішній габарит шини. Його приймемо рівним параметру h_1 рейки КР70, тобто 28 мм. Як можна побачити, цей габарит допускає і використання розрахованого нами п'єзоелемента 16 мм, і наявність товщини стінок шини в 1 мм, і заповненість решти простору іммерсивною рідиною. Приймемо, що ПЕП сприймає акустичні хвилі повністю із шини, ширина котрої за вирахуванням габарити перпендикулярних стінок становитиме 26 мм. Тоді відповідно до [45] по формулі 4.5 коефіцієнт відбиття по тиску становитиме:

$$\xi = \frac{d_{\text{ПЕП}}}{d_{\text{шини}}} \quad (4.5)$$

Відповідно цей параметр для колеса при нестандартному і стандартному місці встановлення становитиме 0,62.

Також необхідно додатково розрахувати вказаний коефіцієнт при стандартному місці встановлення, де він становитиме для рейки широкої колії 0,57, а для рейки кранової 0.37.

Тепер результуючий тиск на перетворювачі у колесі буде рівним відповідно до [45] добутку усіх встановлених коефіцієнтів відповідно для рейки широкої колії при нетиповому місці встановлення:

$$P_{\text{пр}} = 0,024 P_{\text{вип}}$$

Для рейки широкої колії при типовому місці встановлення:

$$P_{\text{пр}} = 0,013 P_{\text{вип}}$$

Для рейки кранової при нетиповому місці встановлення:

$$P_{\text{пр}} = 0,018 P_{\text{вип}}$$

Для рейки кранової при типовому місці встановлення:

$$P_{\text{пр}} = 0,06 P_{\text{вип}}$$

4.2.2. Можливість вдосконалення будови колеса

Через те, що імпеданси двох середовищ (п'єзокераміки та іммерсійної рідини) сильно відрізняються вирахуємо наступне:

$$z_0 = \sqrt{z_1 z_2}$$

Де $z_1 z_2$ імпеданси п'єзокераміки PZT – 5Н та етиленгліколю.

$$z_0 = \sqrt{z_1 z_2} = 7,2 \times 10^6$$

Найближчий імпеданс має вуглецевий склоподібний сиградур $7,38 \times 10^6$

Шар речовини із імпедансом z_0 називається узгоджуючим шаром. Його використовують для покращення акустичного контакту між твердими середовищами. Найчастіше як узгоджуючий шар між випромінювачем УЗК та твердим ОК використовуються рідини, імпеданс яких завжди менший, ніж у твердих матеріалів.

Такий шар є перетворювачем хвилевого опору і забезпечує повне «просвітлення» межі. Також він ще має назву «просвітлюючого» шару, використання якого узгоджує хвилеві опори середовищ, імпеданси яких мають значні розбіжності, та забезпечує максимум передачі енергії (у ідеальній ситуації – 100%, але в реальності за рахунок втрат різної природи знано менше), яка в будь-якому випадку буде більшою, ніж за умови безпосереднього контакту двох середовищ[3].

В такому випадку розрахуємо коефіцієнт проходження ультразвуку через границю п'єзопластина → вуглецевий склоподібний сиградур та вуглецевий склоподібний сиградур → етиленгліколь.

П'єзопластина → вуглецевий склоподібний сиградур

$$Z_n \approx 21,375 \times 10^6$$

$$Z_m \approx 7,38 \times 10^6$$

$$K_{nm} = \frac{2 Z_m}{Z_n + Z_m} = 0,51$$

Вуглецевий склоподібний сиграду́р → п'єзопластина

$$Z_n \approx 7,38 \times 10^6$$

$$Z_m \approx 21,375 \times 10^6$$

$$K_{nm} = \frac{2 Z_m}{Z_n + Z_m} = 1,48$$

Результат проходження у обидві сторони:

$$K_{\text{рез}} = 0,75$$

Вуглецевий склоподібний сиграду́р → етиленгліколь

$$Z_n \approx 7,38 \times 10^6$$

$$Z_m \approx 2,42 \times 10^6$$

$$K_{nm} = \frac{2 Z_m}{Z_n + Z_m} = 0,49$$

Етиленгліколь → вуглецевий склоподібний сиграду́р

$$Z_n \approx 2,42 \times 10^6$$

$$Z_m \approx 7,38 \times 10^6$$

$$K_{nm} = \frac{2 Z_m}{Z_n + Z_m} = 1,5$$

Результат проходження у обидві сторони:

$$K_{\text{рез}} = 0,74$$

Таким чином існує можливість незначно покращити ступінь проходження сигналу по тиску з 0,36 до 0,55 на початковому етапі руху променю.

4.2.3. Вигляд екрану дефектоскопу при використанні іммерсивного колеса

Використання шару іммерсійної рідини вносить корективи у сам процес проведення контролю рейки. Це в першу чергу пов'язано із проходженням ультразвуком вказаного шару. Типовий вигляд дефектоскопу при контролі рейки показано на Рис. 4.5, при цьому на екрані будуть присутні зондуючий сигнал 1, донний ехо-імпульс 2 та сигнал від дефекту 4 (за його наявності).

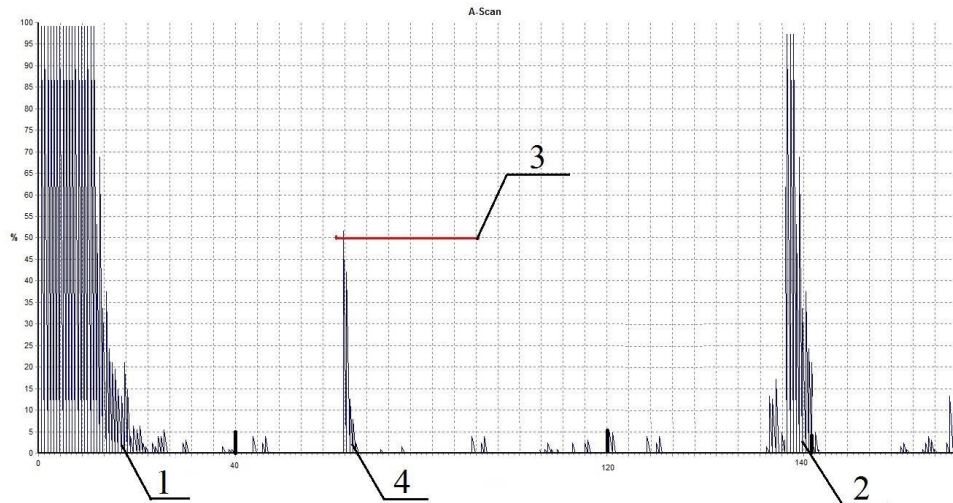


Рис. 4.5 Вигляд екрану дефектоскопу при застосуванні ехо-імпульсного методу для контролю рейки стандартним датчиком

При використанні колеса картина буде відрізнятися наступним чином – зондуючий імпульс зміститься у зону, що заповнена іммерсійною рідиною, а на межі колесо-рейка з'явиться новий сигнал, позначений цифрою 1 на. Червоні

лінії визначають саме головку рейки.

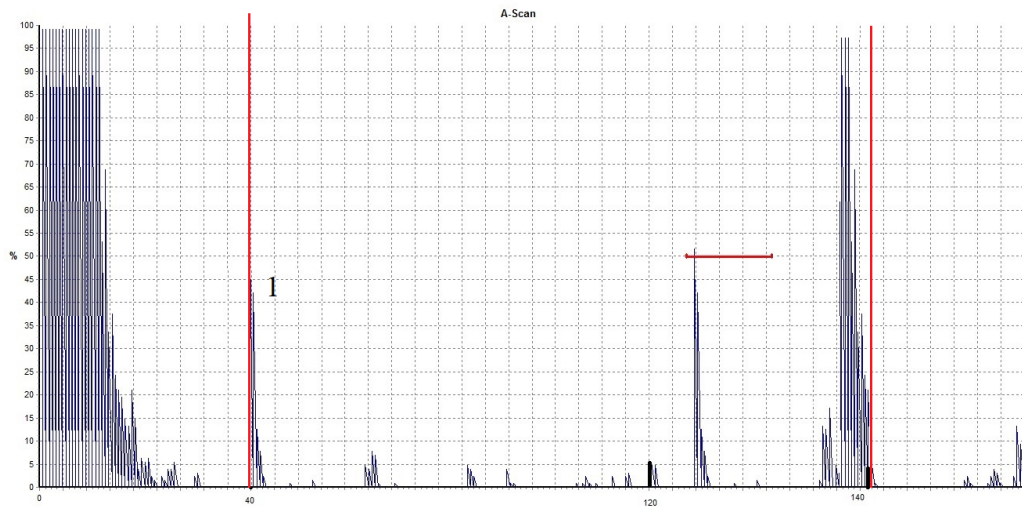


Рис. 4.6 Вигляд екрану дефектоскопу при роботі з іммерсійним колесом

Також варто зазначити і той факт, що необхідно буде змінити параметри налаштувань – при розрахунку ходу променю потрібно буде до товщини ОК додавати шар іммерсійної рідини. Тобто у формулі, що визначає розгортку (3.2) потрібно до H додати протяжність шару іммерсійної рідини H_1 . Однак при встановленні координат стробу враховувати довжину цього шару не рекомендується.

4.3. Розрахунок типового сканера

Оновлений сканер типової будови для використання прямого суміщеного перетворювача може являти собою простий фіксатор ПЕП із системою подачі контактної рідини. Схема будови і встановлення такого сканеру приведені на Рис. 4.4. Тобто сам сканер являє собою прямокутну пластину із вирізом під застосовуваний ПЕП.

Для спрощення розрахунків та забезпечення економічної доцільності необхідно розглянути перетворювач П111-1,25-К20, що доступний на ринку та можливість і результати застосування якого показані у розділі експериментальних даних та у додатках:



Рис. 4.7 Перетворювач П111-2,5-К20-003

Характеристики ПЕП

Частота: 1,25 МГц;

Габаритні розміри: $\text{Ø}25 \times 44$ мм;

Розмір п'єзоелемента: $\text{Ø}20$ мм;

Розмір: стандартний;

Матеріал призми / протектора: зносостійка кераміка.

Ближня зона для П111-2,5-К20 у металевій рейці типу Р-50 (матеріал К76Ф)

$$\text{Ближня зона } (N) = \frac{D^2 f}{4V}$$

$$D = (0,97 \times 20\text{мм})^2$$

$$f = 1,25 \text{ МГц}$$

$$V = 5850 \text{ м/с}$$

$$N = \frac{376,36 \times 1,25}{23,4} = 20,1 \text{ мм}$$

Таким чином ближня зона не досягає цікавлячої нас протилежної грані головки рейки, а тому такий ПЕП може бути використаний для контролю рейки із бокової грані.

Також сканер такого типу матиме неочевидну перевагу над іммерсійним колесом, оскільки при потраплянні на рейку аналогічну показаній на Рис. 3.3 буде гарантовано втратити акустичний контакт і приводити до спрацювання сигналізації дефектоскопу (за умови її налаштування на зникнення сигналу у стробі).

4.4. Розрахунок глибини залягання вихрових струмів для залізничних рейок

Картина розподілу сили вихрових струмів показана на . Використовуючи її можна визначити стандартну глибину проникнення

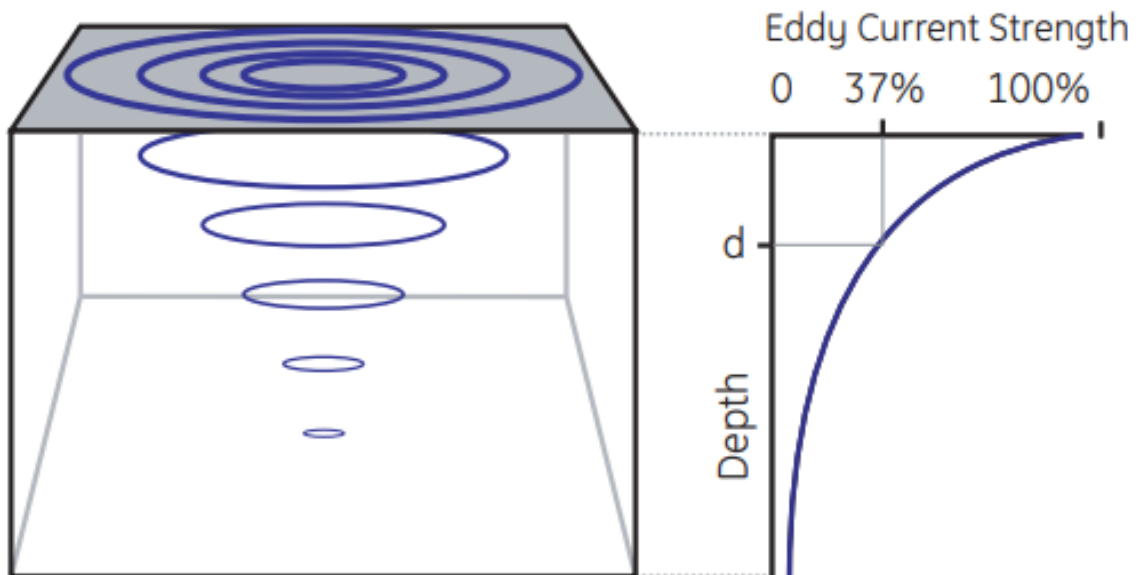


Рис. 4.8. Графік глибини вихрових токів

Стандартна глибина проникнення визначається як та глибина, на якій сила вихрового струму стрімко падає до 37% від значення на поверхні.

$$\delta = 50 \sqrt{\frac{172.41}{\sigma \mu_r f}}$$

$$f = \frac{172.41}{\sigma \left(\frac{\delta}{50}\right)^2}$$

δ - стандартна глибина залягання (мм);

f - частота;

μ_r - відносна проникність.

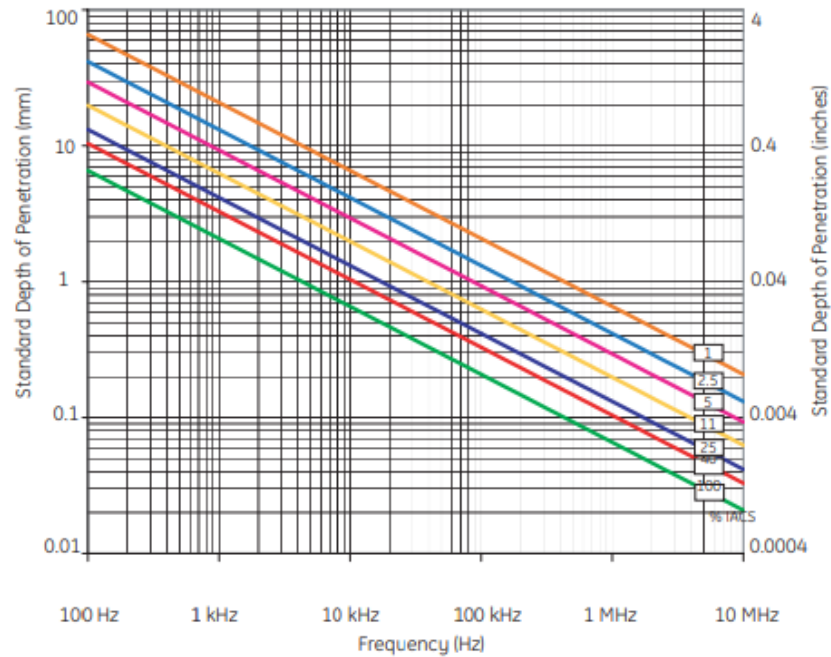


Рис. 4.9. Графік залежності глибини від частоти для різних матеріалів

Значення для сталі в таблиці буде 2,5 (синій колір).

Глибина для частоти у 350кГц буде приблизно 0.7 мм. Для застосовуваної аналогом [27] частоти ця глибина складе 0.9 мм. Зважаючи на це можна сказати, що існує неможливість зведення нанівець якості контролю бокової грані рейки через стан її поверхні (занадто висока жорсткість або наявність шару ржавчини на рейці).

4.5. Висновок до розділу IV

Для побудови та рорахунку параметрів скануючого пристрою комбінованого неруйнівного методу було обрано тип сканеру іммерсійне колесо та додаткові вихрострумові датчики. Через те, що рейкове полотно на деяких ділянках має елементи, які можуть пошкодити скануючий пристрій усі використані сканери зможуть бути використані тільки на лінійних ділянках дороги.

У скануючому пристрої було використано прямий датчик для УЗ неруйнівного контролю, через те що саме такий тип може бути встановлено на бокову грань рейки і таким чином працювати у іммерсійному колесі в потрібній зоні.

Під час розрахунків, одним з найважливіших критеріїв був коефіцієнт проходження ультразвуку з одного середовища в інше. Було розраховано проходження ультразвуку з середовища в середовище по черзі в одну сторону та назад. На першому етапі було розраховано проходження ультразвуку з п'єзопластин різних матеріалів до етиленгліколю для знаходження найкращого коефіцієнту проходження. Найкращий коефіцієнт тримала п'єзокераміка з США PZT – 5Н (не враховуючи п'єзокерамічну плівку ПВДФ) з коефіцієнтом проходження у обидві сторони 0,36. В подальшому для розрахунків була обрана вона. На другому етапі було розраховано проходження з етиленгліколю до поліуритану (шина іммерсійного колеса). На третьому було розраховано проходження УЗ з поліуритану до різних контактних рідин для знаходження найкращого коефіцієнту проходження. Найкращим варіантом контактної рідини стало машинне масло з найкращим коефіцієнтом проходження ультразвуку в обидві сторони рівним 0.98. І четвертим етапом було розраховано проходження з машинного масла до сталі. У кожному етапі були прораховані напрямки проходження в одну сторону та назад.

Таким чином добутком усіх знайдених коефіцієнтів проходження став результуючий коефіцієнт $K_{рез} = 0,04$.

Для покращення результату розрахунків була продумана можливість вдосконалення будови колеса, а саме додавання матеріалу, який би слугував узгоджувачим шаром між середовищами п'єзокераміки та іммерсійної рідини. Така можливість існує через велику різницю між імпедансами цих середовищ. Після розрахунків було виявлено, що узгоджувачим шаром може виступити вуглецевий склоподібний сиградур з імпедансом $7,38 \times 10^6$.

Важливим аспектом ультразвукового контролю є ближня зона, яка не підходить для контролю через можливість отримання некоректного сигналу від дефекту. Було розраховано ближню зону для датчику. Її довжина становить 20,1 мм, що не заважає нам контролювати зону протилежної грані головки рейки.

Також було розраховано глибину залягання вихрових струмів. Головними критеріями для розрахунку були частота контролю та відносна проникність сталі рейки. Глибина складала 0,9 мм, що не дає нам ігнорувати візуальний контроль якості поверхні рейки.

Загальні висновки

Залізничні колії відіграють важливу роль у сьогоденні для України, тому можливе питання контролю їх стану для унеможливлення появи дефектів, які можуть призвести до поломки колії.

На сьогодні існує багато неруйнівних методів для контролю рейки, але найкращими у експлуатації є ультразвуковий та вихрострумний методи контролю. У цій роботі було поєднано ці два методи у тандемний метод контролю. Це було зроблено для розширення зони контролю, та для зменшення недоліків кожного з методів. У випадку з ультразвуковим методом це є мертва та ближня зони, а у випадку вихрострумного методу це глибина контролю. Перший метод (УЗ) виявляє дефекти всередині рейки, коли ж другий (ВС) контролює поверхню. Таким чином можуть бути виявлені майже усі види дефектів, якщо вони розташовані перпендикулярно до проходження вихрових струмів (розривають їх) та якщо вони закривають більшу частину УЗ променя.

Через особливості конструкції залізничної мережі, за для уникнення руйнувань датчика, уся конструкція тандемного приладу розрахована для контролю на лінійних частинах залізниці.

Через близькість хімічного складу у матеріалах, які використовуються при виробництві рейок, комбінований метод можна використовувати на більшості з них. Але все ж таки є різниця для контролю кранових рейок. Через збільшення розміру зерна треба знижувати частоти для контролю.

Після проведення експериментального дослідження з різними датчиками та однаковими частотами та з різними частотами були отримані такі результати:

- при використанні датчиків у 5 МГц та інших, таких як 1,25МГц та 2,5МГц була статистично значима різниця у отриманих результатах;
- при використанні різних датчиків з частотою у 5МГц теж спостерігалась значима різниця в результатах, але слід зауважити, що у порівнянні між собою різних датчиків інших частот великої різниці не було.

Причиною таких результатів можливо є малий діаметр контактної зони перетворювача.

Під час розрахунків найважливішим фактором у нашому випадку був коефіцієнт проходження ультразвуку. Було розраховано найкращу п'єзокерамічну пластину через порівняння багатьох матеріалів для п'єзокераміки, а також була прораховано найкращу контактну рідину, якою стало машинне масло. В обох випадках головним критерієм був акустичний імпеданс і його взаємодія з імпедансом сусіднього середовища. Загальний коефіцієнт проходження був не великим, тому було вирішено додати між середовищами з найбільшим перепадом імпедансів узгоджуючий шар. В цьому випадку ним став вуглецевий склоподібний сиградури з імпедансом $7,38 \times 10^6$.

Розрахунок ближньої зони ультразвуку показав, що у нас не буде проблем з контролем протилежної грані головки рейки, а глибина залягання вихрових токів виявилась не достатньою для нехтування станом поверхні контролю.

Список використаних джерел:

- [1] V. A. Troickij, *Kratkoe posobie po kontrolyu kachestva svarnyh soedinenij* [*Quick guide to quality control of welded joints*]. Kyiv: Phoenix, 2006.
- [2] A. A. Markov i D. A. Shpagin, *Ultrazvukovaya defektoskopiya relsov* [*Ultrasonic flaw detection of rails*]. SpB: «Образование - kultura», 1999.
- [3] Р. М. Галаган, *Теоретичні основи ультразвукового неруйнівного контролю*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019.
- [4] А. А. Марков і Д. А. Шпагин, *Ультразвукова дефектоскопія рельс*. СПб: «Освіта – Культура», 1999.
- [5] ВФМЛН№17, «Параметри пружних хвиль. Отримання знань». .
- [6] І. М. Кучерук, І. Т. Горбачук, і П. П. Луцик, *Механіка. Молекулярна фізика і термодинаміка*. Вінниця: «Техніка», 2006.
- [7] Phy.hk, «Longitudinal wave. Physics simulations». .
- [8] С. Н. Глабец, *Ультразвуковий неруйнівний контроль. Конспект лекцій*. Київ: ДП «Тест», 2017.
- [9] М. М. Дорожовець і В. О. Мокрицький, *Аналого-цифрові перетворювачі: навчальний посібник*. Львів: «Львів», 2013.
- [10] А. Кисельов, С. Соломаха, і К. Мойсенко, *Правила неруйнівного контролю рейок знімними дефектоскопами суцільного контролю (ЦП 0167)*. Київ, 2007.
- [11] Krautkramer, «Principles of eddy current testing. GE inspection technologies», 2005.
- [12] A. Dey, J. H. Kurz, і L. Tenczynski, «Detection and evaluation of rail defects with non-destructive testing methods», 2016.
- [13] А. І. Павлій, *Вихрострумний неруйнівний контроль. Конспект лекцій*. Київ: ДП «Тест», 2017.

- [14] I. D. F. G. & C. KG., «Principles of Eddy Current Testing, training documentation», 2005.
- [15] S.-G. Kwon, T.-G. Lee, S.-J. Park, J.-W. Park, i J.-M. Seo, «Natural Rail Surface Defect Inspection and Analysis Using 16-Channel Eddy Current System», *Appl. Sci.*, vol 11, no 17, 2021, doi: 10.3390/app11178107.
- [16] K. Doraci i A. Hasanaj, «THE OPTIMISING FORCE BALANCE EXERCISED IN THE WHEEL – PROFILE CONTACT FORCE DURING THE CURVED PATH. AN EXPERIMENTAL APPROACH OF USING CURVILINEAR PROFILES», в *RAD Conference Proceedings, volume 2*, 2017, pp 300–303, doi: DOI: 10.21175/RadProc.2017.60.
- [17] МЕТІНВЕСТ, «Вуглецева сталь: класифікація, маркування, застосування». <https://metinvest-smc.com/ua/articles/uglerodistaya-stal-klassifikaciya-markirovka-primenenie/> (accessed Трав 12, 2022).
- [18] МЕТІНВЕСТ, «Легована сталь: особливості, класифікація та характеристики». <https://metinvest-smc.com/ua/articles/legirovannaya-stal-osobennosti-klassifikatsiya-i-kharakteristiki/> (accessed Трав 12, 2022).
- [19] W. R. Calado i R. Barbosa, «Influence of Carbon Content and Deformation Temperature on Ultra-Grain Refinement of Plain Carbon Steels by Means of Torsion Test», *ISIJ Int.*, vol 53, no 5, pp 909–914, 2013, doi: 10.2355/isijinternational.53.909.
- [20] D. Adebisi, B. Adewuyi, i A. A. Afonja, «Effect of carbon content on the grain refinement of locally produced plain carbon steel by thermal cycling», vol 5, pp 1344–1350, Січ 2009.
- [21] Ю. М. Лахтин і В. П. Леонтьева, *Материаловедение: Учебник для высших технических учебных заведений*, 3rd ed. Москва: Машиностроение, 1990.
- [22] J. Tuzik, «Wheel/Rail Interaction '08: Data to Information (Part 2 of 2)», 2008, 2014. <http://interfacejournal.com/archives/377> (accessed Трав 10, 2022).

- [23] M. B. Prime і A. T. DeWald, «Residual stress and its role in failure», в *The Contour Method*, 2013, pp 109–138.
- [24] В. В. Рибкін, А. М. Орловський, М. І. Уманов, Р. Маркуль, і П. Панченко, *Класифікація та каталог дефектів і пошкоджень елементів стрілочних переводів України [Текст]: ЦП-0284; Класифікація та каталог дефектів та пошкоджень рейок залізниць України [Текст]: ЦП-0285*. Київ: Інтерпрес, 2013.
- [25] V. Jemec і J. Grum, «AUTOMATED NON-DESTRUCTIVE TESTING AND MEASUREMENT SYSTEMS FOR RAILS», в *10th European Conference on Non-Destructive Testing, Moscow 2010, June 7-11, 2010*, p 7.
- [26] T. Heckel, H.-M. Thomas, M. Kreutzbruck, і S. Rühle, «High Speed Non-Destructive Rail Testing with Advanced Ultrasound and Eddy-Current Testing Techniques», Січ 2009, [Online]. Available at: https://www.researchgate.net/publication/228901588_High_Speed_Non-Destructive_Rail_Testing_with_Advanced_Ultrasound_and_Eddy-Current_Testing_Techniques.
- [27] OKOndtGroup, «High-Speed Rail Testing System OKOSCAN 73HS», 2021. <https://www.ndt.com.ua/en/products/ut/flaw-detectors/okoscan-73hs> (accessed Трав 12, 2022).
- [28] OKOndtGroup, «TECHNICAL OFFER For The Ultrasonic Double Rail Testing System OKOSCAN UT73HS». <https://content.ndtsupply.com/assets/Uploads/OKOndt-OKOSCAN-73HS-Technical-Information.pdf?clientId=1932082846.1633132800> (accessed Чер 12, 2022).
- [29] U. Service, «UDS2-73 Ultrasonic Double Rail Flaw Detector», *UDS2-73*, 2014. <http://ultracon-service.com.ua/index.php/en/our-devices/item/31-uds2-73-ultrasonic-rail-flaw-detector-en>.
- [30] U. Service, «UDS2-77 Ultrasonic Single Rail Flaw Detector», 2014.

- <http://ultracon-service.com.ua/index.php/en/our-devices/item/91-uds2-77-ultrasonic-single-rail-flaw-detector>.
- [31] Д. В. Паренюк і І. К. Шаповалов, «ОГЛЯД ЗОН КОНТРОЛЮ РЕЙКИ ПРИ НЕСТАНДАРТНОМУ ВСТАНОВЛЕННІ СКАНЕРУ», в *Proceedings of the 14th International scientific and practical conference*, 2022, pp 151–155, [Online]. Available at: <https://sci-conf.com.ua/xiv-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-modern-directions-of-scientific-research-development-13-15-07-2022-chikago-ssha-arhiv/>.
- [32] Д. В. Паренюк, І. К. Шаповалов, К. С. Дрозденко, і В. П. Міщенко, «Аналіз можливості використання пристрою для контролю стану рейки із нестандартним встановленням сканеру», *Мікросистеми, Електроніка та Акустика*, vol 27, no 2, p 8, 2022, doi: <https://doi.org/10.20535/2523-4455.mea.263459>.
- [33] P. Solutions, «Defektoskop vihretokovyj portativnyj VD3-81 [Portable eddy current flaw detector VD3-81]», 2017. <https://www.youtube.com/watch?v=14hWAFKBvFI>.
- [34] U. Service, «EDDYCON C Eddy Current Flaw Detector», 2014. <http://www.ultracon-service.com.ua/index.php/en/our-devices/item/44-eddy-current-flaw-detector-eddycon-c>.
- [35] U. Service, «UD3-71 Flaw Detector for Ultrasonic Testing of Rails and Welds», *UD3-71 Flaw Detector*, 2014. <http://www.ultracon-service.com.ua/index.php/en/our-devices/item/92-ud3-71-flaw-detector-for-ultrasonic-testing-of-rails-and-welds> (accessed Лип 26, 2022).
- [36] U. Service, «SO-3R calibration block», *Ultrasonic Calibration Blocks*, 2014. <http://www.ultracon-service.com.ua/index.php/en/component/k2/item/105-so-3r-calibration-block> (accessed Лип 26, 2022).
- [37] P. Sedgwick, «A comparison of parametric and non-parametric statistical tests.», *BMJ*, vol 350, p h2053, Квіт 2015, doi: 10.1136/bmj.h2053.

- [38] D. G. Altman i J. M. Bland, «Parametric v non-parametric methods for data analysis», *BMJ*, vol 338, 2009, doi: 10.1136/bmj.a3167.
- [39] D. Pareniuk, «Method of evaluation of the minimal sample size for acoustical signal therapy monitored via electroencephalographic activity of human brain», *ScienceRise*, no 2, pp 75–82, 2021, doi: 10.21303/2313-8416.2021.001736.
- [40] A. Nabou, M. D. Laanaoui, M. Ouzzif, i M. houssaini, *Shapiro-Wilk Test to Detect The Routing Attacks In MANET*. 2021.
- [41] Student, «The Probable Error of a Mean», *Biometrika*, vol 6, no 1, pp 1–25, Квіт 1908, doi: 10.2307/2331554.
- [42] Д. В. Паренюк, А. В. Паренюк, К. С. Дрозденко, і С. А. Найда, «Дослідження сукупного впливу стресового фактору та музичного сигналу на психофізичний стан людини», *Мікросистеми, Електроніка та Акустика*, vol 1, no 26, p 9, 2021, doi: <https://doi.org/10.20535/2523-4455.mea.228179>.
- [43] K. Drozdenko *et al.*, «The Influence of a Low-Frequency Musical Fragment on the Neural Oscillations», *Arch. Acoust.*, vol 47, no No 2, pp 169–179, 2022, doi: 10.24425/aoa.2022.141647.
- [44] Geoffmackley, «GoPro mounted under Indonesian Train moving at 100km/h», 2018. .
- [45] С. О. Козерук, О. М. Петрищев, і О. І. Дрозденко, *Акустичні прилади та системи. Методичні вказівки до виконання практичних занять. Частина 2. Акустичні методи неруйнівного контролю*. Київ: ВПК «Політехніка», 2008.

ДОДАТОК А

Табл. 1 Результати вимірювань головки рейки ПЕП №624

П 111-1,25-к20-003 №624		
	дБ	мм
	58	70,13
	56	70,09
	56	70,05
	55	70,13
	55	70,13
	59	70,05
	59	69,98
	53	69,98
	57	69,91
	57	69,94

Табл. 2 Результати вимірювань головки рейки ПЕП №984

П111-2,5-К12-004 №894		
	59	71,08
	54	71,04
	54	70,97
	54	71
	58	70,89
	56	70,42
	56	70,38
	55	70,35
	58	70,89
	56	70,55

Табл. 3 Результати вимірювань головки рейки ПЕП №420

П111-5-К6-004 №420		
	73	71,11
	76	71,55
	72	71,24
	73	70,99
	73	71
	70	71,13
	70	70,97
	70	71,02
	77	70,97
	77	70,66

Табл. 4 Результати вимірювань головки рейки ПЕП №424

П111-5-К6-004 №424		
	72	71,17
	72	71,11
	68	71,11
	71	70,75
	67	70,68
	72	70,95
	70	70,97
	67	70,99
	66	71
	66	71,04