

**О. М. Жеребець**

Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України, м. Київ

ORCID ID: 0000-0002-2059-2045

Researcher ID AAN-1790-2021

## ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ МЕТАЛІВ

*У статті наведено порівняльний аналіз методів ультразвукового контролю якості металів. Розкрито генезис ультразвукового контролю та встановлено завдання реалізації. Розкрито принципи ультразвукового контролю з відокремленням основних компонентів. Підкреслено, що в основі ультразвукового методу закладений принцип прямого п'єзоелектричного ефекту, коли випромінювачем і приймачем ультразвукових коливань є пластина, вирізана з монокристалу кварцу або п'єзокерамічного матеріалу. Наведено основні характеристики п'єзоелементів та способи їх взаємодії. Запропоновано до розгляду три методи ультразвукового контролю якості металів: тінювий, дзеркально-тінювий та ехо-імпульсний методи. Наголошено, що дзеркально-тінювий метод заснований на аналізі зміни амплітуди донного сигналу, ознакою дефекту є зменшення амплітуди донного сигналу нижче порогового рівня. Запропоновано схему розподілу випромінювання при дзеркально-тінювому методі та визначено переваги та недоліки методу. Зазначено, що для контролю тінювим методом застосовуються два перетворювача, що встановлюються з різних сторін об'єкта контролю, один перетворювач є випромінювачем, другий приймачем. Запропоновано схему розподілу випромінювання при дзеркально-тінювому методі та визначено переваги та недоліки останнього. Описано ехо-імпульсний метод, підкреслено, що принцип ехо-імпульсного методу полягає в тому, що під час генерації електричного імпульсу ультразвуковий перетворювач генерує коливання, що передаються об'єкту, який знаходиться під контролем, той самий перетворювач приймає ехо-сигнали, які відображаються від дефектів. Наведено схему розподілу випромінювання при ехо-імпульсному методі та сформувано переваги та недоліки методу. Запропоновано діаграму фронту ультразвукової хвилі, що проходить по глибині керованого об'єкта. Наголошено, що у методиках ультразвукового контролю головним вимірюваним параметром є амплітуда ехосигналу від дефекту.*

*Ключові слова:* метод, ультразвуковий контроль, виробництво, метал, якість, дефектоскоп, п'єзоелектричний елемент, ультразвук.

**А.М. Жеребець**

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА МЕТАЛЛОВ

*В статье приведен сравнительный анализ методов ультразвукового контроля качества металлов. Раскрыто генезис ультразвукового контроля и установлено задание реализации. Раскрыты принципы ультразвукового контроля с отделением основных компонентов. Подчеркнуто, что в основе ультразвукового метода заложен принцип прямого пьезоэлектрического эффекта, когда излучателем и приемником ультразвуковых колебаний является пластина, вырезанная из монокристалла кварца или пьезокерамического материала. Приведены основные характеристики пьезоэлементов и способы их взаимодействия. Предложено к рассмотрению три метода ультразвукового контроля качества металлов: теневой, зеркально-теневой и эхо-импульсный методы. Отмечено, что зеркально-теневой метод основан на анализе изменения амплитуды донного сигнала, признаком дефекта является уменьшение амплитуды донного сигнала ниже порогового уровня. Предложена схема распределения излучения при зеркально-теновом методе и определены преимущества и недостатки метода. Отмечено, что для контроля теновым методом применяются два преобразователя, устанавливаются с разных сторон объекта контроля, один преобразователь является излучателем, второй приемником. Предложена схема распределения излучения при зеркально-теновом и теновом методах, приведены преимущества и недостатки последнего. Описаны эхо-импульсный метод, подчеркнуто, что принцип эхо-импульсного метода заключается в том, что во время генерации электрического импульса ультразвуковой преобразователь генерирует колебания, передающиеся объекту, который находится под контролем, тот же преобразователь принимает эхо-сигналы, которые отражаются от дефектов. Приведена схема распределения излучения при эхо-импульсном методе и сформулированы преимущества и недостатки метода. Предложено диаграмму фронта ультразвуковой волны, проходящей по глубине управляемого объекта. Отмечено, что в методиках ультразвукового контроля главным измеряемым параметром является амплитуда эхосигнала от дефекта.*

*Ключевые слова:* метод, ультразвуковой контроль, производство, металл, качество, дефектоскоп, пьезоэлектрический элемент, ультразвук.

A.M. Zherebets

## COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS OF ULTRASONIC QUALITY CONTROL OF METALS

*The article presents a comparative analysis of methods of ultrasonic quality control of metals. The genesis of ultrasonic control is revealed and the task of realization is established. The principles of ultrasonic control with separation of the main components are revealed. It is emphasized that the ultrasonic method is based on the principle of direct piezoelectric effect, when the emitter and receiver of ultrasonic vibrations is a plate cut from a single crystal of quartz or piezoceramic material. The main characteristics of piezoelectric elements and methods of their interaction are given. Three methods of ultrasonic quality control of metals are proposed for consideration: shadow, mirror-shadow and echo-pulse methods. It is emphasized that the mirror-shadow method is based on the analysis of changes in the amplitude of the bottom signal, a sign of the defect is a decrease in the amplitude of the bottom signal below the threshold level. The scheme of radiation distribution at the mirror-shadow method is offered and the advantages and disadvantages of the method are determined. It is noted that for the shadow method control, two transducers are used, which are installed on different sides of the object of control, one transducer is an emitter, the other a receiver. The scheme of radiation distribution at mirror-shadow and shadow methods is offered, the advantages and disadvantages of the last are resulted. The echo-pulse method is described, it is emphasized that the principle of the echo-pulse method is that during the generation of an electric pulse, the ultrasonic transducer generates oscillations transmitted to the object under control, the same transducer receives the echo signals that are displayed from defects. The scheme of radiation distribution in the echo-pulse method is given and the advantages and disadvantages of the method are formed. The diagram of the front of the ultrasonic wave passing on depth of the controlled object is offered. It is emphasized that in the methods of ultrasonic control the main measured parameter is the amplitude of the echo signal from the defect.*

*Key words:* method, ultrasonic control, production, metal, quality, flaw detector, piezoelectric element, ultrasound.

**Постановка проблеми.** Становлення ультразвукового контролю, як одного з основних методів дослідження якості металів припадає на 50-ті роки минулого століття. Технічна реалізація методів у промисловості обумовлена створенням серійних лампових дефектоскопів та розробкою ультразвукових перетворювачів на основі п'єзоелектричних елементів. Враховуючи часовий проміжок, ґрунтовність сучасних наукових досягнень є вражаючою. Досвід використання методів ультразвукового контролю зростає та методи вдосконалюються.

Ультразвуковий контроль якості металів займає чільне місце, на його частку припадає біля 40% обсягу контролю всіх виробів. Не дивлячись на високий рівень автоматизації праці в розвинених країнах, частка ручного ультразвукового контролю залишається найбільшою. Це пов'язано з тим, що великі обсяги робіт проводяться на об'єктах, що знаходяться в експлуатації: атомні і теплові електростанції, трубопроводи різного призначення, металоконструкції, транспортні засоби та т.д. Характерною рисою зазначених об'єктів є велика різноманітність конструкцій, і отже, методик ультразвукового контролю, тому роботи по контролю погано піддаються автоматизації.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На сьогодні, питання аналізу та застосування методів ультразвукового контролю якості металів на промисловості здійснили чимало науковців.

Дослідження сучасних методів і засобів швидкісної діагностики дефектів залізничних рейок здійснили В. О. Нічога, В. І. Шклярський, В. Г. Сторож, Ю. М. Матієшин, Л. В. Ващишин [1]. Н. І. Чабан, О. М. Карпаш, І. В. Рибіцький та В. Д. Миндюк [2] розглянули питання можливості використання акустичних методів для контролю зміни фізикомеханічних характеристик металоконструкцій довготривалої експлуатації.

Методику вибору перетворювачів з фазованими решітками для визначення розмірів і форм дефектів дослідили О.В. Попович, О.М. Карпаш та М.О. Карпаш [3].

Огляд засад для розробки та поглиблення методів електромагнітно-акустичного контролю металовиробів здійснив С. Ю. Плєснецов [4].

Н.В. Топчій, С.В. Шорнікова та О.В. Альховик [5] розкрили інноваційні механізми неруйнівного контролю в умовах виробництва.

Із зарубіжних авторів варто відзначити такі роботи як: V. Schmitz, M. Kröning, K.J. [6], A.W. Elbern, L. Guimargues [7], S.R. More, A.A. Agashe, P.Jyothi, V.M. Joshi-Bhabha [8], D. Topp, M. Smith [9], Maiseri, H., D. MacLauchlan, and G. Alers [10], Yoseph Bar-Cohen [11], S. J. Song and H. J. Kim [12], R. Krull, H. M. Thomas, R. Pohl, S. Rühle [13] та інші.

Незважаючи на масштабність наукових досліджень за темою роботи, питання аналізу методів ультразвукового контролю якості металів є актуальним та потребує детального опрацювання.

**Постановка завдання.** Здійснити порівняльний аналіз методів ультразвукового контролю якості металів.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** Ультразвуковий контроль якості металів являє собою ультразвукову дефектоскопію, яка по суті є методом неруйнівного контролю. Фундаментальною основою даного методу є ультразвукові хвилі, які розповсюджуються в полі контролю, на поверхні металу та, у разі, виявлення перешкод, відбувається відбиття хвилі.

До завдань ультразвукового контролю якості металів, варто віднести:

- виявлення дефектів зразків металів;
- виявлення місця розташування дефектів зразків металів;
- визначення кількості дефектів зразків металів;
- визначення розмірів дефектів зразків металів;
- визначення типу дефектів зразків металів.

Ультразвук поширюється в просторі хвилями. Фронт хвилі – це межа, що розділяє частки середовища, які коливаються від часток, які ще не почали коливатися.

Хвильові поверхні безперервно переміщуються в середовищі і при цьому деформуються. У однорідного та ізотропного середовищі швидкість кожної точки хвильової поверхні спрямована по нормалі до поверхні і чисельно дорівнює швидкості, званою фазовою швидкістю хвилі. На практиці ультразвукові хвилі найбільш ефективно використовуються в діапазоні частот від 0.5 МГц до 25 МГц [3]. Ефект взаємодії хвиль з внутрішніми дефектами знижується при роботі з низькими частотами, в таких випадках складно виявити дефекти в металевих структурах, за рахунок того, що хвилі з більшою довжиною вже огинають дефекти.

В основі ультразвукового методу закладений принцип прямого п'єзоелектричного ефекту. Випромінювачем і приймачем ультразвукових коливань є пластина, вирізана з монокристалу кварцу або п'єзокерамічного матеріалу. Під дією знакозмінного напруження п'єзопластина змінює свої розміри (розтягується або стискається), перетворюючи електричні коливання в механічні.

Основними характеристиками п'єзоелементів є [2]:

- частотний спектр;
- випромінювана потужність звуку;
- спрямованість випромінювання.

П'єзопластини поміщають в перетворювач, для введення коливань в деталь між контактною поверхнею перетворювача і деталлю наносять шар мастила. Коливання п'єзопластини передаються поруч розташованим частинкам, тобто збуджуються і поширюються пружні хвилі, що поширюються спрямованим пучком променів. Відбиті від перешкоди звукові коливання приймаються і перетворюються в імпульси, які спостерігаються на екрані. Від правильності вибору методики залежить надійність ультразвукового контролю, а вибір методики в свою чергу ґрунтується на характеристиках контрольованого виробу, матеріалу з якого він виготовлений, а також дефектів.

На сьогодні, в умовах промисловості, існує кілька способів виявлення дефектів при використанні ультразвукового контролю:

- тінювий;
- дзеркально-тінювий;
- ехо-імпульсний метод.

Основні відмінності методів полягають в оцінці та реєстрації даних [3].

Дзеркально-тінювий метод заснований на аналізі зміни амплітуди донного сигналу, ознакою дефекту є зменшення амплітуди донного сигналу нижче порогового рівня.

До переваг дзеркально-тінювого методу варто віднести той факт, що за допомогою методу можна виявити дефекти, що знаходяться в мертвій зоні п'єзоелектричного перетворювача, будь-якої орієнтації і форми, які частково або повністю перекривають ультразвуковий пучок.

Недоліки дзеркально-тінювого методу:

- неможливість визначити глибину залягання дефектів;

– низька щільність прилягання контактів, як наслідок перебраковка, пов'язана з втратою акустичного контакту через забруднення або пошкодження поверхні введення, недостатня кількість провідної рідини;

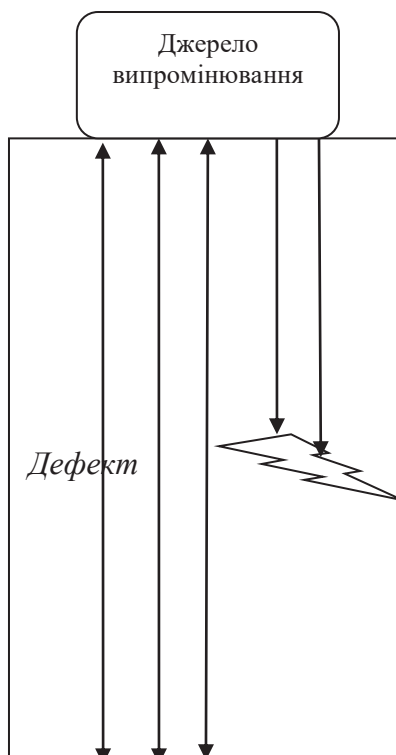


Рис. 1. Схема розподілу випромінювання при дзеркально-тіньовому методі

- велика вірогідність наявності корозії донної поверхні, як наслідок перебраковка;
- непаралельність поверхні введення і донної поверхні, як наслідок перебраковка;
- наявність локальної структурної неоднорідності з великим загасанням ультразвукових хвиль, як наслідок перебраковка;
- максимальний ефект тільки при наявності розвинених дефектів, які перекривають ультразвуковий пучок;
- залежність амплітуди донного сигналу від глибини залягання дефекту, як наслідок низький рівень виявлення дефекту.

Для контролю тіньовим методом застосовуються два перетворювача, що встановлюються з різних сторін об'єкта контролю, один перетворювач є випромінювачем, другий приймачем. Дзеркально-тіньовий метод може реалізуватися одним прямим або подвоєним п'єзоелектричним перетворювачем, який є випромінювачем і приймачем, або двома похилими п'єзоелектричними перетворювачами, що знаходяться з одного боку об'єкта контролю, один п'єзоелектричний перетворювач випромінювач (або випромінювач + приймач), другий приймач (або також випромінювач і приймач).

Принцип ехо-імпульсного методу полягає в тому, що під час генерації електричного імпульсу ультразвуковий перетворювач генерує коливання, що передаються об'єкту, який знаходиться під контролем. Той самий перетворювач приймає ехо-сигнали, які відображаються від дефектів [8]. Цей метод широко застосовується в промисловості завдяки простоті, реалізується у вигляді єдиного перетворювача необхідного для проведення тестування об'єкта. У цьому випадку немає необхідності використовувати конкретні конструкції для розташування та вирівнювання акустичних осей, на відміну від випадку коли використовується два перетворювача [9]. Ультразвуковий неруйнівний метод також дозволяє досить точно виявити місце розташування, глибину виникнення та інтервалу дефекту в об'єкті, що контролюється, щодо датчика. Метод може бути використаний з одностороннім доступом до об'єкта, що контролюється.

При контролі ехо-методом прямим п'єзоелектричним перетворювачем на екрані дефектоскопа спостерігається зондуючий імпульс, донний сигнал і тимчасова селекція ехо-методу, що знаходиться між зондуючим імпульсом і донним сигналом.

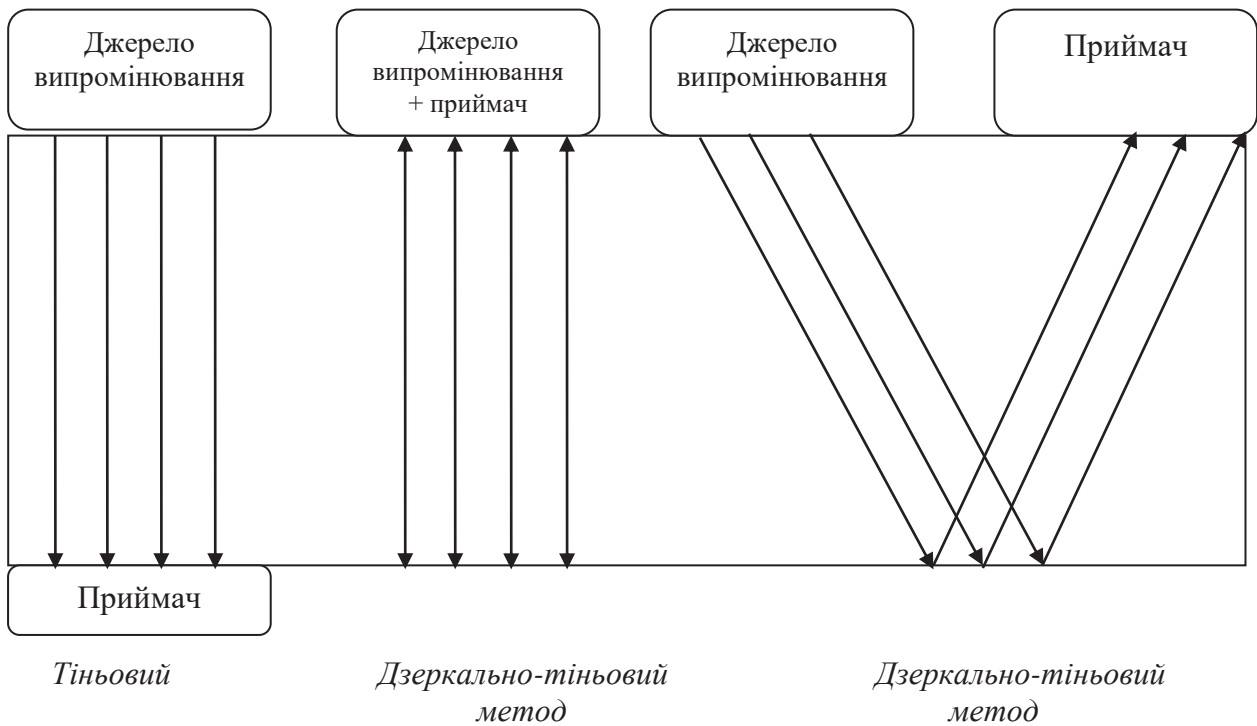


Рис. 2. Схема розподілу випромінювання при дзеркально-тіньовому та тіньовому методах

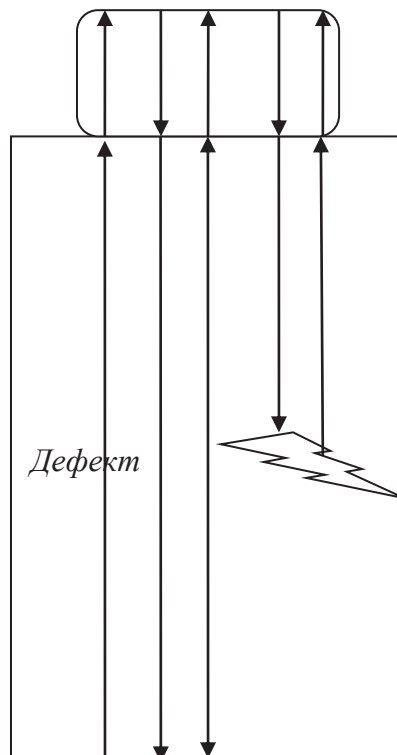


Рис. 3. Схема розподілу випромінювання при ехо-імпульсному методі

До основних переваг характеристик ехо-методу відносять наступне:

© О. М. Жеребець

- максимальна глибина проникнення;
- мінімальна мертва зона;
- висока чутливість;
- максимальна роздільна здатність;
- висока точність розташування та продуктивність.

На додаток до переваг однобічного доступу, ехо-метод має найвищий рівень чутливості для виявлення внутрішніх дефектів, а також високу точність виявлення дефектів. Судячи з амплітудного значення відбитого сигналу, можна виявити розмір дефекту, тоді як за спектральним складом відбитого імпульсу можна виявити тип і форму дефекту.

Діаграма фронту ультразвукової хвилі, що проходить по глибині керованого об'єкта, подана на рисунку 4.

Шлях ультразвукового імпульсу, що проходить від джерела до відбивача і назад і становить:

$$L = ct/2n \quad (2.1)$$

де  $L$  - відстань до об'єкта,  $c$  - швидкість світла у вакуумі,  $n$  - показник заломлення середовища, у якому поширюється випромінювання,  $t$  - час проходження імпульсу до цілі і назад.

(1)

де  $t_3$  – час затримки надходження ехо-імпульсу по відношенню до початкового;  $D$  – відстань від дефект джерела;  $C$  – швидкість ультразвукової хвилі в об'єкті управління.

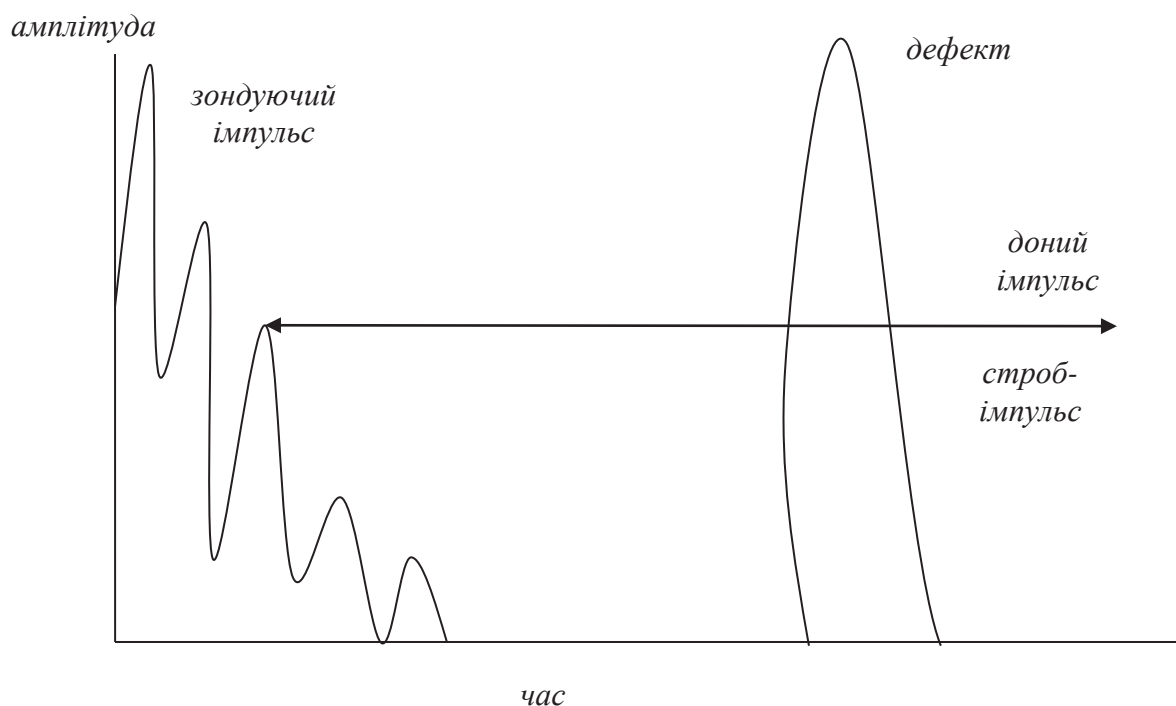


Рис. 4. Діаграма фронту ультразвукової хвилі, що проходить по глибині керованого об'єкта

Обладнання ехо-методу дозволяє визначити поведінку дефекту, класифікувати дефекти відповідно до їх розміру, форми та відстані.

У методиках ультразвукового контролю [2-8] головним вимірюваним параметром є амплітуда ехосигналу від дефекту. Для розбракування ехосигналів за амплітудою встановлюється бракувальний рівень чутливості. Бракувальний рівень налаштовується за стандартним зразком підприємства, на якому виготовлені штучні відбивачі, що імітують максимально допустимий дефект.

Перед проведенням контролю проводиться налаштування дефектоскопа, тобто формування його чутливості до браку. Потім, в процесі контролю, проводиться порівняння ехосигналу від дефекту з бракувальним рівнем. Якщо амплітуда ехосигналу від дефекту більше бракувального рівня – приймається рішення про неприпустимість дефекту, виріб бракується. В іншому випадку дефект вважають допустимим по амплітуді ехосигналу.

Розміри дефекту оцінюються при ультразвуковому контролі за допомогою умовних розмірів. В основному в методиках використовується умовна протяжність дефекту. Умовна протяжність (в міліметрах) визначається на контрольному рівні чутливості, який на 6 дБ нижче бракувального. Ультразвуковий перетворювач переміщують уздовж зварного шва і фіксують два положення паралельно протяжному дефекту, в якому амплітуда ехосигналу знаходиться на контрольному рівні. Умовну протяжність вимірюють лінійкою як відстань між двома позиціями перетворювача. Потім порівнюють знайдену умовну протяжність з максимально допустимою. Якщо виміряне значення більше, ніж максимально допустимий – виріб бракують.

**Висновки і перспективи подальших досліджень.** У роботі здійснено порівняльний аналіз методів ультразвукового контролю якості металів. Доведено, що існуючий достатній спектр методів ультразвукового контролю для виявлення дефектів металевих деталей дозволяє здійснити практично повний огляд засобів. Одним з найбільш перспективних методів є ехо-метод ультразвукового тестування, який має ряд переваг у порівнянні з іншими методами. Однак суттєвим обмеженням наявного на ринку обладнання для ультразвукового контролю із застосування ехо-методу є великі трудові витрати через низьку швидкість тестування.

Отже, перспективи подальших досліджень ґрунтуються, на розробці обладнання, яке б поєднувало високу роздільну здатність та високу швидкість сканування для проведення перевірки. Доцільно використовувати автоматизовані системи для методу акустичних випробувань для проведення випробувань виливків металевих форм під час виробництва, а також на всіх етапах життєвого циклу виробу. Застосування дзеркально-тіньового методу дозволяє забезпечити високий рівень виявлення дефектів, високу якість результатів випробувань та ідентифікацію візуалізованих топологій дефектів.

#### Література:

1. Нічога В. О., Шклярський В. І., Сторож В. Г., Магієшин Ю. М., Ващишин Л. В. Дослідження сучасних методів і засобів швидкісної діагностики дефектів залізничних рейок (огляд). *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2018. №3. С. 8-22.
2. Чабан Н. І., Карпаш О. М., Рибіцький І. В., Миндюк В. Д. Аналіз методів акустичного контролю фізико-механічних характеристик металоконструкцій довготривалої експлуатації. *Методи та прилади контролю якості*. 2018. №2. С. 38-43.
3. Попович О.В., Карпаш О.М., Карпаш М.О. Методика вибору перетворювачів з фазованими решітками для визначення розмірів і форм дефектів. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. Львів: ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України, 2016. №3(52). С. 126-132.
4. Плєснецов С. Ю. Метод та засіб ультразвукового електромагнітно-акустичного контролю феромагнітних металовиробів зі складною формою перетину з невеликим розміром. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Сер.: *Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії* = *Bulletin of National Technical University «KhPI»*. Ser.: *Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy*: зб. наук. пр. Харків: НТУ «ХПІ», 2018. № 23 (1299). С. 51-56.
5. Інноваційні механізми неруйнівного контролю в умовах виробництва / Н.В.Топчій, С.В.Шорнікова, О.В. Альховик. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*. Луцьк, 2020. Вип. № 40. С. 90-96.
6. Schmitz V., Kröning M., Langenberg K.J. Modelling and Visualization of Ultrasonic Testing Situations. *Proc. 12th International Conference and Exhibits on NDE in the Nuclear and Pressure Vessel Industries*, (October 11-13, Philadelphia/Pennsylvania, USA). 1993.
7. Elbern A. W., Guimaraes L. Synthetic aperture focusing technique for image restoration. 2000. *NDTnet*. Vol. 5 No. 08.
8. Patankar - Bhabha V.H. Atomic Research Centre 'India; S.R. More, A.A. Agashe, P.Jyothis, V.M. Joshi-Bhabha Atomic Research Centre 'India. *Multichannel Ultrasonic Imaging System ULTIMA+ 100M8 for NDE of Fabricated Parts*. 15th World Conference on Non-Destructive Testing 15-21 October 2000 in Rome.
9. Topp D., Smith M. Application of the ACFM inspection method to rail and rail vehicles. *Insight*. 2005. Vol. 47. No. 6. P. 354-357.
10. Maseri H., MacLauchlan D., Alers G. Application of EMAT's to In- Place Inspection of Railroad Rails. *DARPA/AFWAL Review of Progress in Quantitative NDE*, Materials Laboratory, Air Force Wright Aeronautical Laboratories, OH, 1981. P. 544-547.

11. Yoseph Bar-Cohen. Emerging NDE Technologies and Challenges at the Beginning of the 3th Millennium. Part 1. *NDT.Net* . 2000, Vol. 5, No. 1. URL: <https://www.ndt.net/article/v05n01/barcohen/barcohen.htm> (Last accessed: 17.03.2021).
12. Song S. J., Kim H. J. Modeling of Radiation Beams from Ultrasonic Transducers in a Single Medium. *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, 2000. Vol. 20, No. 2. P. 91-101.
13. Krull R., Thomas H. M., Pohl R., Rühle S. Eddy current detection of head-checks on the gauge corner of rails: Recent results. 6th International Conference & Exhibition on Railway Engineering. Edinburgh-London: Engineering Technics Press, 2003. 8 p.