

О. С. Білевська

*Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України, м. Київ
<https://orcid.org/0000-0002-2081-1906>*

ЗАСТОСУВАННЯ ЦИФРОВОГО ДЕФЕКТОСКОПУ, ЯК ОДНОГО З НАЙПЕРСПЕКТИВНІШИХ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ

У статті проведено дослідження застосування цифрового дефектоскопу, як одного з найперспективніших методів контролю. Розкрито принципи та методи проведення ультразвукової дефектоскопії. Описано основні компоненти та складові, які беруть участь у здійсненні контролю. Розподіл та механізм впливу звукової хвилі на об'єкт, що підлягає контролю наведено із відокремленням математичної складової, описано фізичний аспект який є фундаментальною основою сучасної цифрової ультразвукової дефектоскопії. Наведено детальний опис звукових хвиль, що використовуються у цифровій дефектоскопії. Підкреслено, що відстань, яку пройде хвиля даної частоти і рівня енергії, залежить від матеріалу, з якого вона поширюється. А до факторів, які визначають відстань, на яку звукова хвиля буде проходити в певному середовищі віднесено поширення променя, загасання і розсіювання. Описано структурну складову ультразвукового дефектоскопу, який складається з ультразвукового генератора / приймача, апаратного та програмного забезпечення для захоплення, а також проведення аналізу сигналів, дисплей форми сигналу і модуль реєстрації даних. Наведено та обґрунтовано сферу застосування всіх типів ультразвукових перетворювачів, використовуваних в додатках для виявлення дефектів. Поетапно розкрито методологію реалізації ультразвукової дефектоскопії. Наголошено, що у деяких спеціалізованих випадках тестування виконується в режимі наскрізної передачі, коли звукова енергія проходить між двома перетворювачами, розташованими на протилежних сторонах випробувального зразка. Визначено типи дефектів, що простежуються при контролі, та вплив променя на кожен з наведених типів. У якості бази подальших досліджень обрано застосування схеми-мультивид, яка на сьогодні є пріоритетною розробкою здатною покращити якість контролю та підвищити точність аналізу.

Ключові слова: цифровий дефектоскоп, метод, контроль, дефект, виробництво, якість, ультразвук, неоднорідність, тріщина.

Е.С. Билевская

ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВОЙ ДЕФЕКТОСКОПА, КАК ОДНОГО ИЗ САМЫХ ПЕРСПЕКТИВНЫХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ

В статье проведено исследование применения цифрового дефектоскопа, как одного из самых перспективных методов контроля. Раскрыты принципы и методы проведения ультразвуковой дефектоскопии. Описаны основные компоненты и составляющие, которые участвуют в осуществлении контроля. Распределение и механизм воздействия звуковой волны на объект, подлежащий контролю приведены с отделением математической составляющей, описано физический аспект который является фундаментальной основой современной цифровой ультразвуковой дефектоскопии. Приведено подробное описание звуковых волн, используемых в цифровой дефектоскопии. Подчеркнуто, что расстояние, которое пройдет волна данной частоты и уровня энергии, зависит от материала, из которого она распространяется. А к факторам, которые определяют расстояние, на которое звуковая волна будет проходить в определенной среде отнесено распространение луча, затухания и рассеяния. Описаны структурную составляющую ультразвукового дефектоскопа, который состоит из ультразвукового генератора / приемника, аппаратного и программного обеспечения для захвата, а также проведение анализа сигналов, дисплей формы сигнала и модуль регистрации данных. Приведены и обоснованно сферу применения всех типов ультразвуковых преобразователей, используемых в приложениях для выявления дефектов. Поэтапно раскрыто методологию реализации ультразвуковой дефектоскопии. Отмечено, что в некоторых специализированных случаях тестирование выполняется в режиме сквозной передачи, когда звуковая энергия проходит между двумя преобразователями, расположенными на противоположных сторонах испытательного образца. Определены типы дефектов, наблюдаются при контроле, и влияние луча на каждый из приведенных типов. В качестве базы дальнейших исследований избран применения схемы-мультивид, которая на сегодня является приоритетной разработкой способной улучшить какие-то контроля и повысить точность анализа.

Ключевые слова: цифровой дефектоскоп, метод, контроль, дефект, производство, качество, ультразвук, неоднородность, трещина.

E.S. Bilevska

DIGITAL FAULT DETECTOR APPLICATION AS ONE OF THE MOST PERSPECTIVE METHODS OF CONTROL

The article studies the use of digital flaw detector as one of the most promising methods of control. The principles and methods of ultrasonic flaw detection are revealed. Describes the main components and components involved in the

implementation of control. The distribution and mechanism of the sound wave on the object to be controlled is given with the separation of the mathematical component, describes the physical aspect which is the fundamental basis of modern digital ultrasonic flaw detection. A detailed description of sound waves used in digital flaw detection is given. It is emphasized that the distance traveled by a wave of a given frequency and energy level depends on the material from which it propagates. And the factors that determine the distance over which the sound wave will travel in a particular environment include the propagation of the beam, attenuation and scattering. The structural component of an ultrasonic flaw detector is described, which consists of an ultrasonic generator / receiver, hardware and software for capturing, as well as signal analysis, a waveform display and a data logging module. The scope of application of all types of ultrasonic transducers used in applications for defect detection is given and substantiated. The methodology of ultrasonic flaw detection is gradually revealed. It is noted that in some specialized cases, testing is performed in the mode of through transmission, when the sound energy passes between two transducers located on opposite sides of the test sample. The types of defects traced during the inspection and the effect of the beam on each of these types are determined. As a basis for further research, the application of the multi-type scheme was chosen, which is currently a priority development that can improve some controls and increase the accuracy of analysis.

Keywords: digital flaw detector, method, control, defect, production, quality, ultrasound, in homogeneity, crack.

Вступ та постановка проблеми дослідження. На сьогодні, з усіх додатків промислового ультразвукового контролю дефектоскопія є найстарішою і найбільш поширеною на сучасних промислових підприємствах. З 1940-х років закони фізики, що регулюють поширення звукових хвиль через тверді матеріали, використовувалися для виявлення прихованих тріщин, пустот, пористості та інших внутрішніх неоднорідностей в металах, композитах, пластмасах та кераміці. Високочастотні звукові хвилі відбиваються від дефектів, створюючи характерні сигнали, які можуть відображатися і записуватися портативними інструментами. Ультразвуковий контроль є повністю безпечним та не має руйнівного впливу. Він добре зарекомендував себе, як метод випробувань в багатьох основних виробничих, переробних і обслуговуючих галузях, особливо в областях застосування зварних швів і конструкційних металів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Застосування цифрового дефектоскопу, як одного з найперспективніших методів контролю є пріоритетним напрямком напрацювань багатьох як вітчизняних так і зарубіжних вчених.

Аналізу можливостей використання вихростумових дефектоскопів для контролю якості феромагнітних металовиробів присвячено дослідження Л. Р. Коваленко та О. І. Коваленко [1]. У роботі розглянуто перспективи використання вихрострумів дефектоскопів для поточного контролю феромагнітних металовиробів. Використання дозволяє досліджувати порожнини і внутрішню поверхню отворів, деталі, конструкції різної форми на наявність дефектів, що забезпечує збільшення продуктивності методу контролю металовиробів і скорочення витрат дефектоскопічних матеріалів.

Основні питання діагностики матеріалів, конструкцій та якості покриттів розкрили В. І. Савуляк, Д. В. Бакалець та О. В. Поступайло [2]. Виявленню сигналів дефектів при магнітодинамічній діагностиці залізничних рейок шляхом використання вейвлет-перетворень присвятив свою роботу Л.В. Ващишин [3].

Питання застосування автоматизованої дефектоскопії плоских та об'ємних дефектів тривало експлуатованих об'єктів є одним з актуальних в умовах сьогодення. До вивчення цього питання підійшли Д. Баран, І. Мірявець, А. Сташко [4]. Згідно проведеного дослідження перспективним є 3-D реконструкція корозійних дефектів програмними методами використанням статистичного опису кородованих поверхонь, застосування методів математичного моделювання процесів розпорошеного та локалізованого корозійного пошкодження стінок труби.

Учені А.О. Попаденко та С.В. Колесніченко[5] провели експериментальне дослідження термографічного контролю для виявлення тріщин у сталевих конструкціях на основі якого довели, що використання теплового неруйнівного способу контролю значно збільшує імовірність знаходження місць розташування небезпечних прихованих дефектів та пошкоджень та підвищує якість результатів проведення обстеження технічного стану металевих конструкцій.

Із зарубіжних варто рів варто відзначити такі роботи як: Aro, M. D., Brashaw, B. K., Donahue, P. K. [6], Mori, M., Hasegawa, M., Yoo, J.-C., Kang, S.-G., Matsumura, J. [7], Marhenke, T., Neuenschwander, J., Furrer, R., Twiefel, J., Hasener, J., Niemz, P., Sanabria, S. J. [8], Skliar, D., Smirdriakova, M., Sedliacik, J.[9], Bal, B. C., Bektaş, İ., Mengeloğlu, F., Karakuş, K., ÖkçeşDemir, H. [10], Bekhta, P., Salca, E.-A. [11], Aydin, I., Demirkir, C., Colak, S., Colakoglu, G. [12], Zauner, M.,

Keunecke, D., Mokso, R., Stampanoni, M., Niemz, P. [13], Susainathan, J., Eyma, F., DeLuycker, E., Cantarel, A., Castanie, B. [14] та інші.

Проте, враховуючи описані наукові набутки, за темою, питання дієвого застосування цифрового дефектоскопу, як одного з найперспективніших методів контролю залишається відкритим та потребує детального опрацювання.

Мета статті. Мета дослідження полягає у проведенні дослідження застосування цифрового дефектоскопу, як одного з найперспективніших методів контролю.

Викладення основного матеріалу дослідження. В основі ультразвукової дефектоскопії лежить принцип фізики, що ґрунтується на розподілі звукових хвиль у середовищі. Звукові хвилі – це організовані механічні коливання, які проходять через середу, яка може бути твердим тілом, рідиною або газом. Ці хвилі проходять з певною швидкістю та в заданому напрямку, і коли звукові хвилі зустрінуть кордон з іншим середовищем, вони будуть відобразитися або передаватися відповідно до правил розподілу.

Всі звукові хвилі коливаються з певною частотою або числом коливань / циклів в секунду, які сприймаються як висота звуку у діапазоні 20 кГц, що є діапазоном чутного звуку. Людський слух має максимальну частоту близько 20 000 циклів в секунду, в той час як більшість додатків ультразвукової дефектоскопії використовують частоти від 500 000 до 10 000 000 циклів в секунду (від 500 кГц до 10 МГц). На частотах в мегагерцовому діапазоні звукова енергія не поширюється через повітря або інші гази, але вона вільно проходить через більшість рідин і звичайні технічні матеріали.

Швидкість звукової хвилі варіюється в залежності від середовища, через яке вона поширюється, на неї впливають її щільність і пружні властивості. Звукові хвилі різних типів поширюються з різною швидкістю.

Будь-який тип звукової хвилі має пов'язану довжину хвилі, яка представляє собою відстань між будь-якими двома відповідними точками в хвильовому циклі, коли вона проходить через середовище. Довжина хвилі пов'язана з частотою і швидкістю рівнянням:

$$\lambda = \frac{c}{f},$$

де λ – довжина хвилі; c – швидкість звуку; f – частота.

Довжина хвилі – це обмежує фактор, який контролює кількість інформації, яка може бути отримана з поведінки хвилі при її розсіюванні. При ультразвуковій дефектоскопії загальноприйнята нижня межа виявлення невеликого дефекту становить половину довжини хвилі. Все, що менше цього, буде невидимим.

Звукові хвилі в твердих тілах можуть існувати в різних режимах поширення, які визначаються типом руху хвилі. Поздовжні і поперечні хвилі є найбільш поширеними модами, використовуваними в ультразвуковій дефектоскопії. Іноді також використовуються поверхневі і пластинчасті хвилі.

Таблиця 1

Види звукових хвиль використовувані у цифровій дефектоскопії

Назва звукової хвилі	Опис
Поздовжня хвиля або хвиля стиснення	характеризується рухом частинки в паралельно напрямку поширення хвилі. Чутний звук існує у вигляді поздовжніх хвиль
Здвигова або поперечна хвиля	характеризується рухом частинки перпендикулярно напрямку поширення хвилі
Поверхнева або релеєвська хвиля	має еліптичний рух частинок і поширюється по поверхні матеріалу, проникаючи на глибину приблизно однієї довжини хвилі
Пластинчаста хвиля чи хвиля Лемба	складна модель коливань в тонких пластинах, де товщина матеріалу менше однієї довжини хвилі, а хвиля заповнює весь поперечний переріз середовища

Звукові хвилі можуть перетворюватися з однієї форми в іншу. Найчастіше поперечні хвилі генеруються в досліджуваному матеріалі шляхом введення поздовжніх хвиль під обраним кутом.

Відстань, яку пройде хвиля даної частоти і рівня енергії, залежить від матеріалу, з якого вона поширюється. Як правило, тверді і однорідні матеріали передають звукові хвилі більш ефективно, ніж м'які, неоднорідні або зернисті. Три фактори визначають відстань, на яку звукова хвиля буде проходити в даному середовищі: поширення променя, загасання і розсіювання. У міру просування променя передня кромка стає ширше, енергія, пов'язана з хвилею, поширюється по більшій площі, і в кінцевому підсумку енергія розсіюється. Загасання – це втрата енергії, пов'язана з передачею звуку через середу, по суті, ступінь поглинання енергії при русі фронту хвилі вперед. Розсіювання – це випадкове відображення звукової енергії від кордонів зерен і подібної мікроструктури. У міру того, як частота знижується, Розширення променя збільшується, але зменшуються ефекти ослаблення і розсіювання. Для конкретного застосування слід вибирати частоту перетворювача, щоб оптимізувати ці змінні.

Коли звукова енергія, що проходить через матеріал, зустрічає кордон з іншим матеріалом, частина енергії буде відображатися назад, а частина буде проходити через неї. Кількість відображеної енергії або коефіцієнт відображення залежить від відносного акустичного імпедансу двох матеріалів. Акустичний імпеданс, в свою чергу, являє собою властивість матеріалу, яка визначається як щільність, помножена на швидкість звуку в даному матеріалі. Для будь-яких двох матеріалів коефіцієнт відображення у відсотках від падаючого енергетичного тиску можна розрахувати за формулою:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$$

де R – коефіцієнт відображення (відсоток відображеної енергії); Z_1 – акустичний імпеданс першого матеріалу; Z_2 – акустичний імпеданс другого матеріалу.

При ультразвуковій дефектоскопії, у більшості випадків це метал / повітря, коефіцієнт відображення наближається до 100%. Практично вся звукова енергія відбивається від тріщини або іншого розриву на шляху хвилі. Це фундаментальний принцип, який уможливує ультразвукову дефектоскопію, як один з найперспективніших методів контролю.

Звукова енергія на ультразвукових частотах сильно спрямована, а звукові промені, які використовуються для дефектоскопії, чітко визначені. У ситуаціях, коли звук відбивається від кордону, кут відбиття дорівнює куту падіння. Звуковий промінь, падаючий на поверхню перпендикулярно, буде відображатися у зворотному напрямку. Звуковий промінь, падаючий на поверхню під кутом, буде відображатися вперед під тим же кутом.

Звукова енергія, яка передається від одного матеріалу до іншого, згинається відповідно до закону заломлення Снеліуса¹. Знову ж, промінь, який рухається прямо, буде продовжувати рух в прямому напрямку, але промінь, який дійде до кордону під кутом, буде зігнутий відповідно до формули:

$$\frac{\theta_1}{\theta_2} = \frac{V_1}{V_2}$$

де θ_1 – кут заломлення в першому матеріалі; θ_2 – кут заломлення в другому матеріалі; V_1 – швидкість звуку в першому матеріалі; V_2 – швидкість звуку в другому матеріалі.

Це співвідношення є важливим фактором при випробуванні кутового променя.

Ультразвукові перетворювачі – це пристрої, які перетворюють електричну енергію у високочастотну звукову енергію і навпаки.

Типові перетворювачі для ультразвукової дефектоскопії використовують активний елемент, зроблений з п'єзоелектричної кераміки, композиту або полімеру. Коли цей елемент збуджується електричним імпульсом високої напруги, він коливається в певному діапазоні частот і генерує сплеск звукових хвиль. Передня поверхня елемента зазвичай покрита пластиною, яка захищає його від пошкоджень, а задня поверхня приклеюється до матеріалу підкладки, який механічно гасить вібрації після завершення процесу генерації звуку. Оскільки звукова енергія на ультразвукових частотах не поширюється через гази, між перетворювачем і випробувальним зразком зазвичай використовується тонкий шар рідини або гелю.

¹Закон Снеліуса або закон Снела визначає напрям розповсюдження променя [світла](#), який падає на плоску границю розділу двох середовищ

Існує п'ять типів ультразвукових перетворювачів, використовуваних в додатках для виявлення дефектів:

– контактні перетворювачі – використовуються в безпосередньому контакті з випробовуваним зразком. Вони вводять звукову енергію перпендикулярно поверхні і зазвичай використовуються для виявлення порожнеч, пористості і тріщин, паралельних зовнішньої поверхні деталі, а також для вимірювання товщини;

– перетворювачі кутового променя – використовуються в поєднанні з пластиковими або епоксидними клинами (кутовими балками) для введення поперечних або поздовжніх хвиль у випробувальний зразок під заданим кутом по відношенню до поверхні. Вони зазвичай використовуються при контролі зварних швів;

– перетворювачі з лінією затримки – включають короткий пластиковий хвилевід або лінію затримки між активним елементом і тестованим зразком. Вони використовуються для поліпшення дозволу поблизу поверхні, а також при високотемпературних випробуваннях, коли лінія затримки захищає активний елемент від теплового ушкодження;

– занурювальні перетворювачі – призначені для передачі звукової енергії у випробуваний зразок через стовп води або водяну баню. Вони використовуються у додатках для автоматичного сканування, а також в ситуаціях, коли потрібно чітко сфокусований промінь для поліпшення дозволу дефектів;

– двоелементний перетворювач – використовуються окремі елементи передавача і приймача в одній збірці. Вони часто використовуються в додатках, пов'язаних з шорсткими поверхнями, грубозернистими матеріалами, виявленням точкової корозії або пористості, а також забезпечують хорошу стійкість до високих температур.

Сучасні ультразвукові дефектоскопи – невеликі портативні мікропроцесорні прилади, які генерують і відображають ультразвуковий сигнал, який інтерпретується оператором, часто за допомогою програмного забезпечення для аналізу, для виявлення та класифікації дефектів у випробувальних зразках. Зазвичай вони включають в себе ультразвуковий генератор / приймач, апаратне і програмне забезпечення для захоплення і аналізу сигналів, дисплей форми сигналу і модуль реєстрації даних.

Секція генератора / приймача – це ультразвуковий передній кінець дефектоскопа. Він забезпечує імпульс збудження для збудження перетворювача, а також посилення і фільтрацію відображених ехосигналів. Амплітуду, форму і загасання імпульсу можна контролювати для оптимізації характеристик перетворювача, а посилення і смугу пропускання приймача можна регулювати для оптимізації відносин сигнал / шум.

Сучасні дефектоскопи зазвичай реєструють сигнал в цифровому вигляді, а потім виконують на ньому різні функції виміру і аналізу. Таймер використовується для синхронізації імпульсів датчика і забезпечення калібрування відстані.

Внутрішні реєстратори даних використовуються для запису повної форми сигналу і докладної інформації про налаштування, пов'язаної з кожним тестом, якщо це необхідно для цілі документації, або обраної інформації, такої як амплітуда сигналу, показання глибини або відстані, або наявність чи відсутність умов тривоги.

Ультразвукова дефектоскопія – це в основному порівняльний метод. Використовуючи відповідні еталони, а також знання про поширення звукових хвиль і загальноприйняті процедури тестування, оператор визначає конкретні шаблони ехосигналів, що відповідають еталону і типових дефектів. Потім зразок сигналу від випробувального зразка можна порівняти зі зразком з цих калібрувальних стандартів, щоб визначити його стан.

Випробування прямим пучком з використанням контактних датчиків, датчиків з лінією затримки, здвоєних елементів або іммерсійних датчиків зазвичай використовуються для виявлення тріщин або розшарувань, паралельних поверхні випробувального зразка, а також пустот і пористості. Він використовує основний принцип, згідно з яким звукова енергія, що проходить через середовище, буде продовжувати поширюватися доти, поки вона або не розсіється, або не відіб'ється від кордону з іншим матеріалом, наприклад, повітрям, що оточує дальню стіну, або тріщини, що знаходяться всередині. У цьому типі випробувань оператор з'єднає перетворювач зі зразком, щотестується і визначає місцезнаходження сигналу, що повертається від дальньої стінки тестового зразка, а потім шукає будь-які сигнали, які приходять перед цим луна-сигналом від

задньої стінки, не враховуючи шум розсіювання зерна, якщо він присутній. Акустично значуще відлуння, яке передує луна-сигналу задньої стінки, має на увазі наявність ламінарної тріщини або порожнечі. Шляхом подальшого аналізу можна визначити глибину, розмір і форму структури, що створює відображення.

Звукова енергія буде поширюватися на дальню сторону деталі, але відбиватися раніше, якщо є ламінарна тріщина або аналогічний розрив.

У деяких спеціалізованих випадках тестування виконується в режимі наскрізної передачі, коли звукова енергія проходить між двома перетворювачами, розташованими на протилежних сторонах випробувального зразка. Якщо на шляху проходження звуку є великий дефект, промінь буде заблокований, і звуковий імпульс не досягне приймача.

Випробування кутовим променем –тріщини або інші неоднорідності, перпендикулярні поверхні випробувального зразка або нахилені по відношенню до цієї поверхні, зазвичай невидимі при випробуваннях прямим променем через їх орієнтації щодо звукового променя. Такі дефекти можуть виникати в зварних швах, в металевих деталях конструкцій і в багатьох інших важливих компонентах. Для їх виявлення використовуються методи кутового променя, в яких використовуються або блоки перетворювачів із загальним кутовим променем (клин), або іммерсійні перетворювачі, вирівняні таким чином, щоб направляти звукову енергію у випробуваний зразок під обраним кутом. Випробування кутовим променем особливо поширене при контролі зварних швів.

Типові вузли кутового пучка використовують перетворення мод і закон Снеліуса для генерації поперечної хвилі під обраним кутом (найчастіше 30, 45, 60 або 70 градусів) у випробувальному зразку. У міру того як кут падаючої поздовжньої хвилі по відношенню до поверхні збільшується, збільшується частина звукової енергії, яка перетворюється в поперечну хвилю в другому матеріалі, і якщо кут досить великий, вся енергія в другому матеріалі буде у вигляді поперечних хвиль.

Вигнутий звуковий промінь дуже чутливий до тріщин, перпендикулярних поверхні випробуваного зразка (випробування на першій ділянці) або, після відбиття від далекої сторони, до тріщин, перпендикулярних поверхні з'єднання (випробування на другій ділянці). Різні кути променя і положення зонда використовуються для пристосування до різної геометрії деталей і типів дефектів.

Висновки та перспективи подальших досліджень. У роботі досліджено застосування цифрового дефектоскопу, як одного з найперспективніших методів контролю. Ультразвукові цифрові дефектоскопи перетворюють електричну енергію у високочастотну звукову енергію і навпаки, є максимально точними та витрачаються мінімум часу на проведення діагностики. За рахунок технологічного розвитку, складові цифрового дефектоскопу (активний елемент, ультразвуковий генератор / приймач, апаратне і програмне забезпечення для захоплення і аналізу сигналів, дисплей форми сигналу і модуль реєстрації даних) з кожним роком вдосконалюються, що призводить до підвищення якості контролю.

Перспективи подальших досліджень ґрунтуються на вдосконаленні способу проведення контролю за рахунок застосування схеми-мультивид, яка дозволяє здійснювати багаторакурсне підсвічування об'єкта контролю у момент застосування цифрового дефектоскопу.

Список літератури:

1. Коваленко Л.Р., Коваленко О.І. Аналіз можливостей використання вихростумових дефектоскопів для контролю якості феромагнітних металовиробів. *Науковий вісник ТДАТУ*, 2019. Вип. 9. Т. 1. С. 1-7.
2. Савуляк В. І., Бакалець Д. В., Поступайло О. В. Діагностика матеріалів, конструкцій та якості покриттів : лабораторний практикум. Вінниця: ВНТУ, 2018. 77 с.
3. Ващишин Л. В. Виявлення сигналів дефектів при магнітодинамічній діагностиці залізничних рейок шляхом використання вейвлет-перетворень та нейронних мереж : дис. ... канд. техн. наук : 05.12.17 / Нац. ун-т «Львів. Політехніка». Львів, 2018. 185 с.
4. Баран Д., Мірявець І., Сташко А. Автоматизована дефектоскопія плоских та об'ємних дефектів тривало експлуатованих об'єктів нафтогазового комплексу. «Інформаційні

- моделі, системи та технології»: матеріали VI науково-технічної конференції, (Тернопіль, 12-13 грудня 2018 року. Тернопіль: ТНТУ, 2018. С. 6.
5. Попаденко А.О., Колесніченко С.В. Експериментальне дослідження термографічного контролю для виявлення тріщин у сталевих конструкціях. *Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин*. 2020. № 45. С. 80-90.
 6. Aro M. D., Brashaw B. K., Donahue P. K. Mechanical and Physical Properties of Thermally Modified Plywood and Oriented Strand Board Panels. *Forest Products Journal*. 2014. 64 (7-8). P. 281–289. doi: <https://doi.org/10.13073/fpj-d-14-00037>
 7. Mori M., Hasegawa M., Yoo J.-C., Kang S.-G., Matsumura J. Nondestructive evaluation of bending strength of wood with artificial holes by employing air-coupled ultrasonics. *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 110. P. 24–31. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.020>
 8. Marhenke, T., Neuenschwander, J., Furrer, R., Twiefel, J., Hasener, J., Niemz, P., Sanabria, S. J. Modeling of delamination detection utilizing aircoupled ultrasound in wood-based composites. *NDT & E International*. 2018. Vol. 99. P.1–12. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2018.05.012>
 9. Skliar, D., Smirdriakova, M., Sedliacik, J. Selected physical and mechanical properties of plywood faced with wood slices. *Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen*. 2017. Vol. 59 (1). P. 97–105. doi: <http://doi.org/10.17423/afx.2017.59.1.09>
 10. Bal B. C., Bektaş İ., Mengeloğlu F., Karakuş K., Ökkeş Demir H. Some technological properties of poplar plywood panels reinforced with glass fiber fabric. *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 101. P. 952–957. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.152>
 11. Bekhta P., Salca E. A. Influence of veneer densification on the shear strength and temperature behavior inside the plywood during hot press. *Construction and building materials*. 2018. Vol. 162. P. 20-26. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.161>
 12. Aydin I., Demirkir C., Colak S., Colakoglu G. Utilization of bark flours as additive in plywood manufacturing. *European Journal of Wood and Wood Products*. 2016. Vol.75 (1). P. 63–69. doi: <https://doi.org/10.1007/s00107-016-1096-0>
 13. Zauner M., Keunecke D., Mokso R., Stampanoni M., Niemz P. Synchrotron-based tomographic microscopy (SbTM) of wood: development of a testing device and observation of plastic deformation of uniaxially compressed Norway spruce samples. *Holzforschung*. 2012. Vol. 66 (8). P. 973–979. doi: <https://doi.org/10.1515/hf-2011-0192>
 14. Susainathan J., Eyma F., De Luycker E., Cantarel A., Castanie B. Experimental investigation of impact behavior of wood-based sandwich structures. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2018. Vol. 109. P. 10–19. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.02.029>