

ДОСЯГНЕННЯ ІЕЗ ім. Є.О. ПАТОНА НАН УКРАЇНИ В ГАЛУЗІ РЕНТГЕНТЕЛЕВІЗІЙНОГО, УЛЬТРАЗВУКОВОГО ТА ІНШИХ МЕТОДІВ НЕРУЙНВНОГО КОНТРОЛЮ (Огляд)

В.О. Троїцький, М.Н. Карманов, С.Р. Михайлов

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: ndt@paton.kiev.ua

Для ефективного моніторингу стану відповідальних споруд необхідно постійно вдосконалювати методи неруйнівного контролю (НК). Традиційно ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України (ІЕЗ) займав у цій галузі провідні позиції. В останні роки в ІЕЗ активно проводяться роботи в галузі безплівкової радіографії. Для безплівкового радіоскопічного контролю довгомірних об'єктів створено високочутливий рентгенотелевізійний детектор, у якому використовується недорогий стоматологічний міні-сенсор S10811-11 (Hamamatsu Photonics, Японія). Такий детектор протяжних об'єктів повинен знайти широке застосування у вітроенергетиці, атомній енергетиці, авіакосмічній промисловості та інших галузях, де є потреба виявляти тріщини з розкриттям до 20 мк. Наведено останні розробки з тангенціального просвічування газорозподільних і побутових магістралей та ін. робіт в області моніторингу небезпечних об'єктів. Бібліогр. 11, табл. 4, рис. 16.

Ключові слова: безплівковий радіоскопічний контроль, зшивання зображень, портативний детектор, стоматологічний сенсор, тангенціальне просвічування

В останні роки [1] в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України було розроблено технології рентгенотелевізійного (РТК) контролю зварних з'єднань з легких сплавів і неметалевих матеріалів для літальних апаратів, лопатей вітроенергетичних установок, залізничних коліс (НК-364), трубопроводів атомних реакторів (НК-321). Безперервно розширюються технологічні можливості фізичних методів, особливо магнітних, ультразвукових, цифрових, комп'ютеризованих вихрострумових дефектоскопів і низькочастотних далекодіючих антен, які дають змогу оцінювати якість довгомірних споруд без сканування їх поверхні та які потрібні практично в усіх галузях промисловості.

В ІЕЗ виконано багато цікавих досліджень у різних областях НК [2, 3]:

- контроль протяжних об'єктів без сканування їх поверхні за допомогою низькочастотних ультразвукових хвиль, використовуючи стінки об'єктів у якості хвильоводів нормальних акустичних хвиль;
- використання безконтактного збудження акустических хвиль в об'єкті за допомогою електромагнітно-акустичних перетворювачів;
- визначення параметрів дефектів за допомогою дифракції акустичних хвиль на гострих кутах дефектів (TOFD) та синтезованої фокуруючої апертури (SAFT), яка забезпечує інформацією про форму та місце розташування внутрішніх дефектів;
- створення портативних засобів цифрової рентгенотелевізійної техніки, яка розширює області застосування НК;
- порівняльні випробування поверхневих методів НК, у тому числі магніто-оптичний (МОМ).

© В.О. Троїцький, М.Н. Карманов, С.Р. Михайлов, 2022

В ІЕЗ працює унікальна високоенергетична радіаційна лабораторія з біологічним захистом до 18 МеВ, в якій проводяться дослідження виробів великої товщини (до 80 мм по сталі) із використанням потужних рентгенівських апаратів і бетатронів, реалізується тангенційне просвічування тіл обертання та ін. Тангенційне просвічування у поєднанні з цифровою обробкою інформації суттєво розширює можливості радіаційних методів.

На рис. 1 показано два стаціонарних рентгенівських апарати (РУП 150/300 і «Екстравольт-360»), які застосовуються в цій лабораторії. На рис. 2 наведено фрагменти технології тангенційного просвічування тіл обертання, яка дозволяє визначити кінцеву товщину металу, зазори між обшивкою та тілом, внутрішнє заповнення об'єму тощо. Поки що ця унікальна технологія в Україні реалізується тільки в ІЕЗ [4, 5]. Для цього методу розроблено кольорову селекцію границь радіаційного зображення стінок труби та наступних нашарувань, наприклад, теплоізоляції [3].



Рис. 1. Стаціонарні рентгенівські апарати РУП 150/300 і «Екстравольт-360»

На рис. 2 у якості зразка зображений відрізок труби діаметром 60 мм, товщина стінок труби 5 мм, товщина ізоляції 2 мм; H_c – товщина стінки труби; H_i – товщина теплоізоляції. На рис. 2, *a* пояснюється принцип тангенційного просвічування, на рис. 2, *б-г* – отримувана інформація. Точність визначення товщини стінки труби при звичайній обробці зображень складає $5 \pm 1,5$ мм. Розроблений алгоритм цифро-

вої обробки зображень забезпечує підвищення точності вимірювань товщини стінки труби до $5 \pm 0,2$ мм.

Найважливішою процедурою радіаційного контролю є розшифровка та архівування його результатів. На рис. 3, *a* показано систему цифрової обробки зображень. Структурну схему програмного забезпечення системи цифрової обробки рентгенограм наведено на рис. 3, *г*.

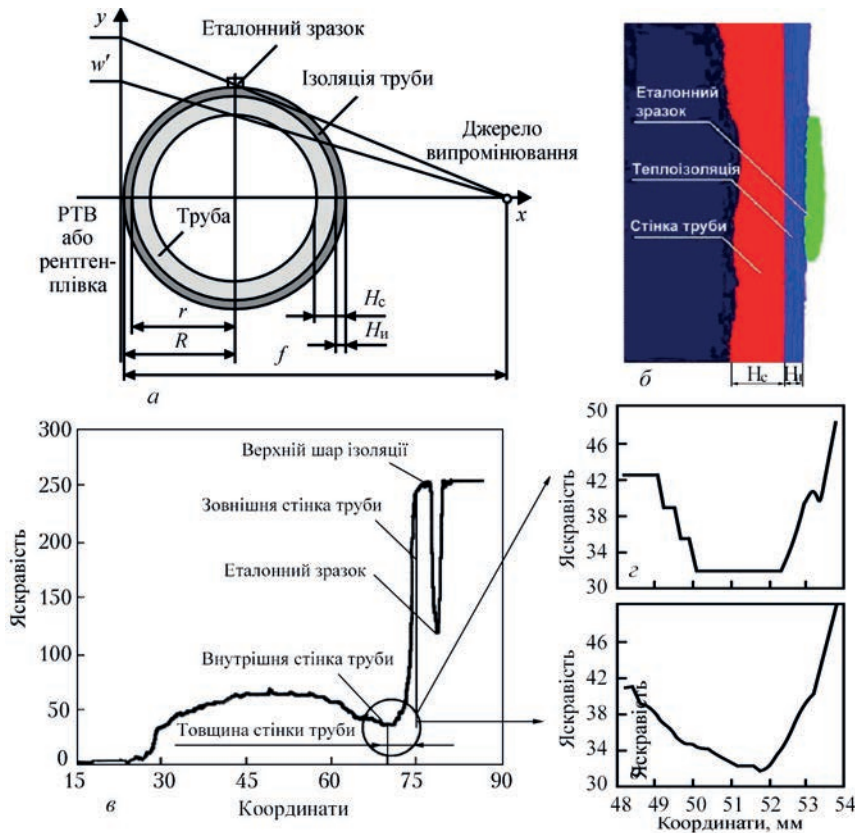


Рис. 2. Фрагменти технології тангенційного просвічування тіл обертання: *a* – схема тангенційного просвічування стінки труби; *б* – кольорова селекція радіаційного зображення стінки труби; *в, г* – поперечний розподіл яскравості початкового радіаційного зображення експериментального зразка (краї зображень стінок труби без цифрової обробки виражені нечітко); *д* – краї зображень стінок труби після цифрової обробки виражені чітко

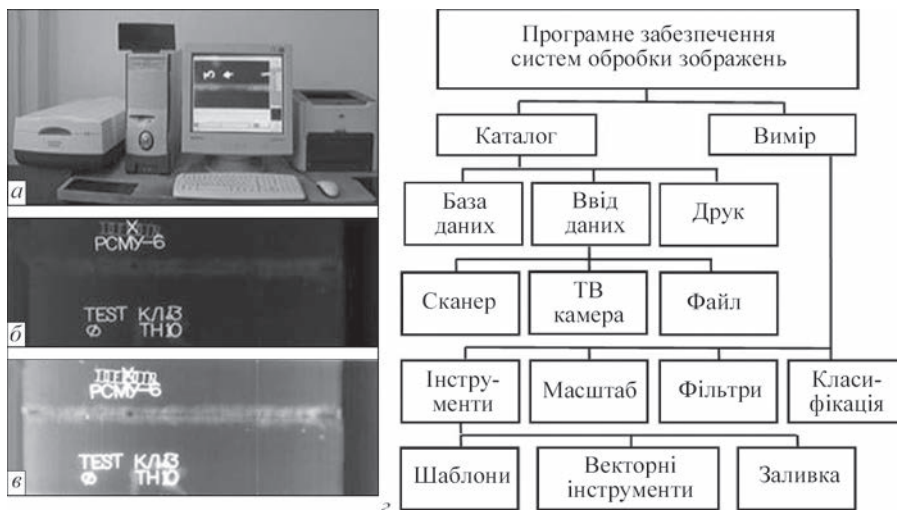


Рис. 3. Система цифрової обробки рентгенограм: *a* – робоче місце оператора, *б* – зображення вихідної рентгенограми зварного з'єднання, *в* – зображення рентгенограми зварного з'єднання після цифрового контрастування, *г* – структура програмного забезпечення

Можливості розробленої цифрової системи обробки інформації:

- сканування зображень з високою роздільною здатністю, яке дозволяє знаходити дефекти, що важко виявляються;
- незалежне масштабування зображень;
- безпосереднє вимірювання довжини відрізка або ламаної лінії, а також периметру та площі дефекту;
- інвертування, обернення у зеркальне відображення зображень;
- запам'ятовування довільної кількості інтерпретацій обробки зображень;
- зберігання початкових і оброблених зображень, а також супутньої текстової інформації в комп'ютерній базі даних;
- архівування та документування результатів контролю;
- підвищення достовірності та ефективності радіаційного контролю.

У радіаційній дефектоскопії значним досягненням була розробка фундаментальних понять детермінованої та статистичної оцінки цих результатів. Уперше було розроблено статистичні еталони, які забезпечують більш об'єктивну оцінку якості, ніж детерміновані, якими користуються в усьому світі. При оцінці якості радіаційного зображення за допомогою статистичних еталонів оператор не знає розташування та розмірів штучних дефектів.

Нещодавно знайдено цікаві рішення на основі магнітооптичного методу візуалізації (МОВ). Засоби на основі цього методу окрім дефектів надають інформацію про залишкові магнітні поля на поверхні феромагнітних матеріалів. Метод МОВ застосовується в криміналістиці. Дослідження показали, що він може використовуватись і в техніці для оцінки якості прецизійної обробки поверхні полірованих болтів кріплення потужних турбін, поверхні клапанів та їх седлищ потужних двигунів тощо. Він є найточнішим методом, який виявляє як тонкі дефекти, так і локальні навантаження металу. На рис. 4, 5 показано принципову схему МОВ і порівняльні результати з іншими методами (візуальним, капілярним, магнітопорошковим).

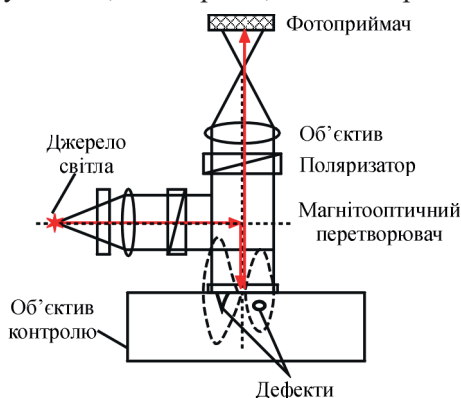


Рис. 4. Принципова схема МОВ

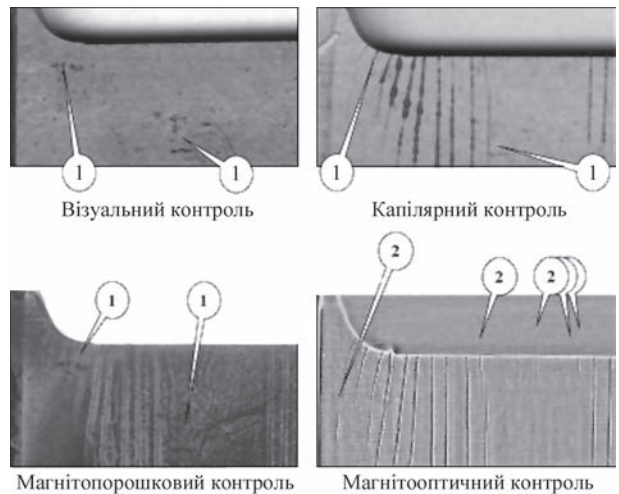


Рис. 5. Порівняльні результати методів контролю

На рис. 5 цифрами 1 і 2 позначено світлові пігментації (шуми об'єкту) та дрібні тріщини, візуалізовані усіма методами, що порівнюються, 3 – особливо дрібні тріщини, які виявляються тільки магнітооптичним методом.

Магнітооптичний контроль ґрунтується на візуалізації топографії магнітного поля розсіювання дефектів за допомогою ферит-гранатової плівки, у якій структура магнітних доменів є чутливою до незначних зовнішніх магнітних полів.

Досліджено способи магнітооптичного контролю прокату та зварних з'єднань як за допомогою проміжного носія інформації (магнітної стрічки), так і безпосередньо за допомогою магнітооптичного перетворювача. Магнітооптичний метод дозволив виявляти дрібні дефекти, які «не бачать» інші методи.

Важливою особливістю МОВ-метода з лазерно-оптичною візуалізацією магнітних полів є наведення в реальних розмірах як поверхневих і підповерхневих дефектів, так і локальних навантажень структури металу. Відповідно до рис. 5 МОВ-метод є чутливішим за традиційні методи для досліджень поверхонь.

Безперечним досягненням останніх років є створення портативного цифрового рентгенотелевізійного обладнання (рис. 6) на основі високочутливих ПЗЗ-матриць (напівпровідниковий прилад із зарядовим зв'язком) і флуоресцируючих CsJ-екранів. Портативність, наявність цифрової обробки зображень, низька вартість надають нові можливості для виконання радіаційного контролю в польових і цехових умовах багатьох об'єктів, які в даний час не забезпечені можливостями НК. Так, численні газо-, нафто- і гідророзподільчі трубопроводи малого діаметру, технологічні трубопроводи нафтохімічного виробництва у даний час в Україні практично не перевіряються на наявність внутрішніх дефектів з-за високої вартості плівкової радіографії, фізичних обмежень



Рис. 6. Портативне цифрове рентгенотелевізійне обладнання УЗК для тонкостінних об'єктів великої кривизни. Впровадження у найближчі роки засобів портативного РТК вирішить цю проблему. Дана система портативного РТК дозволяє виконувати рентген-контроль на порядок дешевше та швидше, ніж при рентгенографії.

На рис. 7 показано діяльність співробітників ІЕЗ з неруйнівного контролю різних об'єктів. Це: мостові перекриття (рис. 7, а), в яких виявлено великі розшарування; елементи важкого обладнання (рис. 7, б, в), яке працює під великим тиском; різноманітні трубопроводи (рис. 7, г-з); вузли компресорних станцій, різні металоконструкції. В Україні практично немає жодної значної споруди,

де б тією чи іншою мірою не було б використано потенціал ІЕЗ.

Для пошуку внутрішніх дефектів отримав значний розвиток ультразвуковий (УЗ) контроль. Він є портативнішим, дешевшим за рентгенографічний метод і інформативнішим для виявлення площинних та тріщиноподібних дефектів. Тому розробка нових і вдосконалення існуючих технологій УЗК є одним з основних завдань дефектоскопії. За останні десятиріччя багато сил витрачено на впровадження УЗ-технологій та засобів для реалізації ультразвукових хвиль дифракції (метод TOFD). Це – метод точного визначення розташування та розмірів гострокінцевих внутрішніх дефектів.



Рис. 7. Діяльність співробітників ІЕЗ ім. Є.О. Патона з неруйнівного контролю різних об'єктів

На рис. 8 пояснюється принцип методу TOFD, який полягає в наступному. Два ультразвукових перетворювача (випромінювач та приймач) розташовуються назустріч один одному. Випромінювач збуджує поздовжню хвилю у широкому кутовому діапазоні. УЗ-хвилі на приймач потрапляють у наступній послідовності: головна хвиля; хвиля, дифрагована на верхній кромці тріщини; хвиля, дифрагована на нижній кромці; хвиля, відбита від донної поверхні.

Перевагою цього методу є те, що дифрагована на кромці тріщини хвиля випромінюється у широкому кутовому діапазоні і тому розташування приймача відносно тріщини не є таким критичним, як для традиційних методів УЗК. Іншою перевагою цього методу є не амплітудний, а часовий спосіб оцінювання розмірів і розташування внутрішніх дефектів.

Аналіз кількісного співвідношення дефектів різного виду у зварних з'єднаннях труб великого діаметру показує, що більше 80 % дефектів – об'ємні (табл. 1). Це – пори та шлакові включення. Відносна кількість найбільш потенційно небезпечних площинних дефектів (непровари

рів і тріщин) складає ~10 %. Площинні дефекти збільшують своє розкриття при експандуванні та гідровипробуваннях, так як в процесі цих процедур розтягувальні зусилля досягають 0,9 межі плинності.

Тому труби для газопроводів після експандування та гідровипробувань проходять повторний повний цикл НК. Причому на здавальному УЗК поперечних тріщин виявляється в 2...10 рази більше, тобто тріщини після експандування розкриваються сильніше за непровари. Для того, щоби впровадити такий великий об'єм НК, знадобилося багато років і незаперечні докази на різних рівнях важливості розширення системи НК, насичення її різними методами.

Технологія НК у трубозварювальному виробництві потребує дослідження дефектних ділянок також за допомогою ручного УЗК, плівкової радіографії, що доповнює рентгенотелевізійний метод, і металографії, магнітопорошкового, вихрострумового методів (за бажанням замовника). Ручним УЗК підтверджується 86 % дефектів, з яких є неприпустимими приблизно 28 %. Критерієм істини вважається радіографія. Дослідження дефектних ділянок за допомогою плівкової радіографії та металографії показали, що результати УЗК підтверджуються більшим відсотком неприпустимих дефектів. За відображаючою здатністю природні дефекти настільки різні, що, наприклад, дрібні рядкові включення в основному металі дають значно більшу амплітуду ехосигналу, ніж шлакові включення та пори у шві, які підлягають обов'язковому виправленню. Тому амплітуда ехосигналу при УЗК не є однозначною мірою оцінки місць відображення, а, з іншого боку, чутливість контролю не може бути 100%-ю без пропуску дефектів, які підлягають виправленню. Тобто філософія допустимості труб до експлуатації повинна постійно трансформуватися.

Результати основних засобів АУЗК і РТК залежать від багатьох обставин. У табл. 2 наведено кількісні співвідношення дефектів, отриманих при близьких технологічних процесах, у трубах зі сталей марок X-70, 09Г2ФБ, 10Г2ФБ. Із табл. 2 видно, що найбільше труб (до 40 %) було забраковано при АУЗК труб зі сталі марки 10Г2ФБ. У той же час після РТК відправлено в ремонт всього 16,7 % труб. АУЗК фіксує, що велика кількість дефектів пов'язана з поганою якістю металу первинного листа, наявністю на кромках розшарувань та розкочених рядкових включень металургійного характеру.

Особливо важливим сучасним напрямком у моніторингу стану матеріалів і конструкцій є безплівкова радіографія. Сучасні плоскочаспелньні рентгенівські датчики дозволяють отримувати рентгенівські зображення безпосередньо при рентгеноскопії контролюємого об'єкта, які сумірні з форматом рентгенівської плівки (20...50 см). Широкий

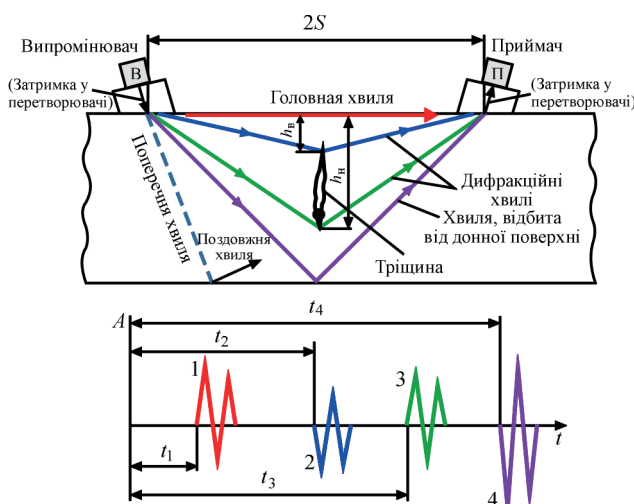


Рис. 8. Метод TOFD: 1 – сигнал головної хвилі; 2 – сигнал, викликаний дифракцією на верхній кромці тріщини; 3 – сигнал, викликаний дифракцією на нижній кромці тріщини; 4 – донний сигнал; t – затримка часу між випромінюванням і прийомом сигналів від відповідних УЗ-хвиль; h_b, h_n – відстань від поверхні виробу до верхнього і нижнього країв тріщини

Таблиця 1. Кількісне співвідношення дефектів різного виду у зварних з'єднаннях труб великого діаметра

Вид дефекту	Кількість труб з дефектами, %, до	Кількість дефектів певного типу, %, до
Непровар	2,0	10,0
Пори та шлаки	1,5	4,0
Пори	13,0	50,0
Шлаки	4,0	18,0
Тріщини поздовжні	0,1	0,5
Тріщини поперечні	0,1	0,5
Пропали	0,1	0,5
Інші дефекти	4,0	16,0

Таблиця 2. Кількісні співвідношення дефектів в трубах

Результати неруйнівного контролю	Технологічна ділянка НК Марка сталі			Здавальна ділянка НК Марка сталі		
	X-70	09Г2ФБ	10Г2ФБ	X-70	09Г2ФБ	10Г2ФБ
Проконтрольовано труб АУЗК, шт.	8594	5485	2900	8784	5095	2583
Труб, забракованих АУЗК, %	19,4	16,2	40,0	20,0	11,7	21,1
Проконтрольовано труб РТК, шт.	3048	1164	1318	3170	775	779
Відправлено у ремонт по РТК, у тому числі труб за видами дефектів, %:	23,6	33,7	16,7	4,8	5,4	1,8
непровар	0,8	1,2	0,5	0,2	0,2	–
непровар на кінці труби	0,3	0,6	0,5	0,06	0,2	–
пори та шлаки	0,7	1,5	0,7	0,09	–	0,1
пори	15,4	21,6	9,3	3,8	4,3	1,0
шлаки	2,6	2,7	3,0	0,3	0,4	0,3
тріщини поперечні	0,2	0,2	0,08	0,09	0,1	0,3
тріщини поздовжні	0,07	–	–	0,2	0,2	0,1
пропали	0,2	0,2	0,2	0,06	0,2	–
інші дефекти	3,3	5,6	2,6	–	–	–

спектр цих приладів представлений компаніями: DÜRR DENTAL (Німеччина) [6], Sentinel NDT Equipment (США), Varian Imaging Components (США) [7], PerkinElmer (США), GE Measurement & Control (Великобританія), Thales Group (Франція).

Головним недоліком таких панелей є їх висока вартість і відносно низька роздільна здатність (близько 100 мкм), яка в декілька разів поступається кращим рентгенівським плівкам. В ІЕЗ запропоновано новий напрям цифрової рентгенографії. Основна ідея його полягає у створенні радіоскопічних скануючих детекторів на базі недорогих високочутливих мініатюрних твердотільних датчиків, які використовуються в медицині (стоматології), наприклад, S10811-11 (Hamamatsu Photonics) [8] (рис. 9) і DR 7 NDT (DÜRR) [9].

Наведемо унікальні технічні характеристики сенсора S10811-11 (Hamamatsu Photonics):

- робоча зона 34×24 мм;
- роздільна здатність 1700×1200 пікселів (25 пар ліній на мм);
- АЦП 12 біт;
- розмір пікселя 20 мкм;
- розмір сенсора 42,5×30×13 мм.

Висока роздільна здатність такого сенсора дозволяє виявляти мікрровключення, мікротріщини з дуже тонкою структурою (20...25 мкм). Їх можна використовувати у системах контролю безпеки, наприклад, для ідентифікації тонких дротів, деталей детонаторів тощо. За їхньою допомогою можна створювати рентгенівські системи для роботи у невеликих замкнутих просторах. Засадницькі патенти і перші наукові роботи у цій області були українськими [10, 11]. Такі сенсори мають невеликий розмір робочої зони (30...40 мм), яка менше, ніж у традиційних рентгенівських плівок. Область, що контролюється, може скануватися по всій поверхні об'єкта з подальшим цифровим (програмним) зшиванням суміжних фрагментів послідовно

Таблиця 3. Результати вимірювань діаметра дротів еталону чутливості

Номер дроту	1	2	3	4	5	6
Вимірний діаметр (мм)	0,4	0,32	0,25	0,2	0,16	0,125
Реальний діаметр (мм)	0,4	0,32	0,26	0,18	0,16	0,1

зчитаних сенсором рентгенівських знімків. Висока частота дискретизації рентгенівського зображення, отриманого за допомогою міні-сенсора, дозволяє отримати десятикратне збільшення розміру контрольованого фрагмента зображення на екрані комп'ютера без втрати його якості. У цьому випадку дискретні розміри рентгенівського зображення (1200×1700 пікселів) відповідають дискретним розмірам екрану комп'ютера.

Для оцінки точності вимірювання геометричних характеристик контролюємих об'єктів використовується еталон чутливості 10FEEN за стандартом EN ISO 19232-1:2016. Вимірювання відстані між дротами еталону чутливості та їх товщини наведено у табл. 3. Відхилення результатів вимірювань відстані між дротами від оптимальних не перевищує 1 %. Допускається відхилення цього розміру для вказаного зразка в 20 %, тобто можливості розроблених в ІЕЗ радіоскопічних систем вище за прийняті у цій області міжнародні стандарти.

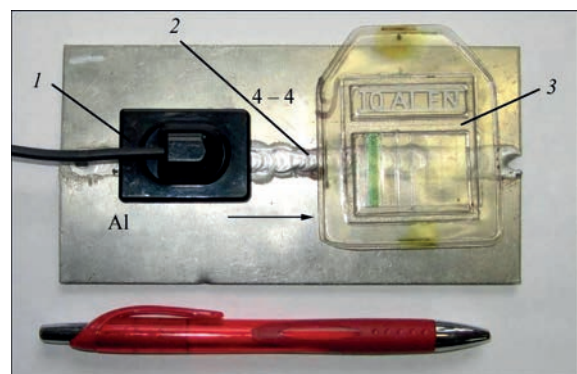


Рис. 9. Сенсор S10811-11 (1) на зварному з'єднанні (2) разом з дротовим еталоном (3)

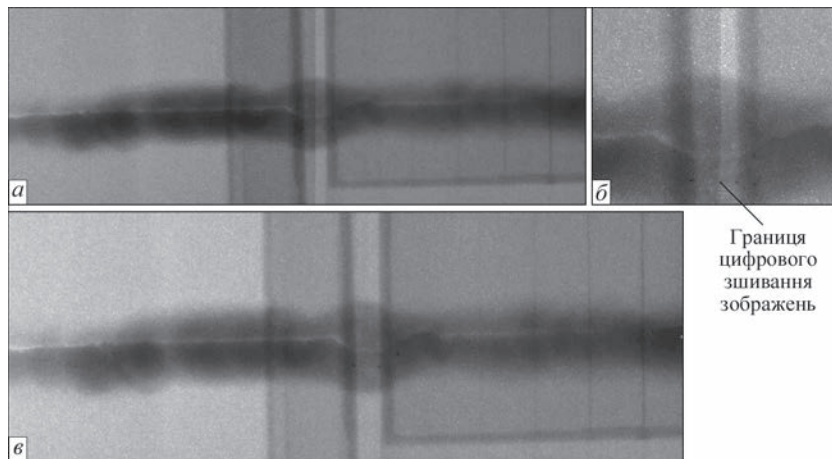


Рис. 10. Зшивання цифрових рентгенівських зображень

Розташування сенсора S10811-11 на зварному з'єднанні показано на рис. 9.

На рис. 10 наведено зображення, які отримані при невеликому перекритті їх суміжних границь. Вони аналізуються на точний збіг границь (рис. 10, а). Границі зображення добре видно після зшивання цифрового зображення (рис. 10, б). Було розроблено програмне забезпечення для приведення зображень до одного контрасту для підвищення якості цифрового зшивання (рис. 10, в). На зображенні рис. 10, в видно темні вертикальні та горизонтальні широкі смуги. Це – сліди вертикальної поліетиленової упаковки еталона чутливості.

Запатентовано пристрій недорогого прецизійного рентгенотелевізійного скануючого детектора (сканера) для контролю протяжних об'єктів на основі міні-сенсора [11] (рис. 11).

Рентгенівський сенсор переміщується покроково. Крок переміщення дорівнює ширині робочого поля

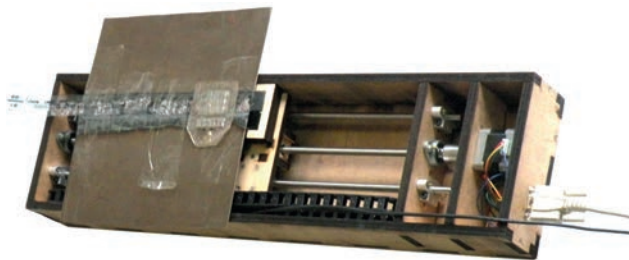


Рис. 11. Детектор рентгенотелевізійний скануючий на основі мініатюрного сенсора

датчика. Окремі фрагменти цифрових рентгенограм зварного з'єднання, які отримані при скануванні, зберігаються у комп'ютері та програмно зшиваються в єдине повноформатне цифрове зображення.

Для визначення початкової точки координат каретки у двох крайніх її положеннях було встановлено механічні кінцеві вимикачі EndStop Ramps 1.4. При наїзді каретки сканера на кінцевик його контакти замикаються, відповідний сигнал передається до блоку управління сканером по кабелю та надходить на мікроконтролерну систему управління кроковим двигуном, ініціюючи мікропрограму зупинки двигуна.

Результат такого рентгенотелевізійного контролю за допомогою системи, яка зображена на рис. 12, може передаватися по інтернету.

Наведемо кілька прикладів застосування нового типу рентгенівського скануючого детектора із використанням рентгенівського апарату РАП-150/300. Результати просвічування стикового зварного з'єднання сталевого листа (розмірами 125×240 мм і товщиною 1 мм) з еталоном чутливості 13FEEN за EN ISO 19232 на режимі: напруга на трубі $U = 60$ кВ, анодний струм $I = 10$ мА, час формування (накопичення) зображень $t = 5$ с наведено на рис. 13.

На рис. 13, а показано окремі фрагменти рентгенограми зварного з'єднання, а на рис. 13, б – повноформатна рентгенограма, яка отримана цифровим зшиванням окремих фрагментів. Час



Рис. 12. Блок-схема цифрової рентгенотелевізійної системи

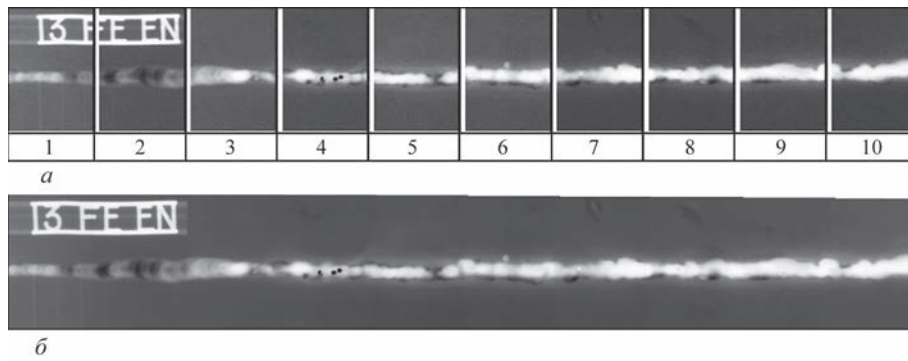


Рис. 13. Фрагменти рентгенограми зварного з'єднання: а – вихідні фрагменти рентгенівських зображень (24×34 мм), б – результати зшивання фрагментів зображень (повноформатне рентгенівське зображення, отримане з окремих фрагментів)

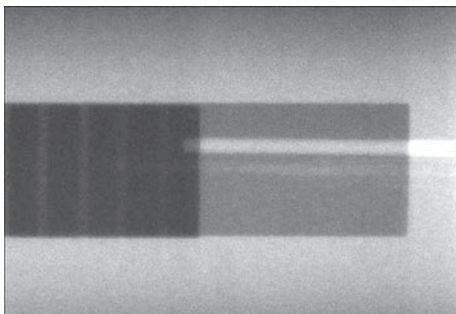


Рис. 14. Рентгенограма ділянки труби. Діаметр труби 48 мм, радіаційна товщина виробу 6 мм, чутливість 0,1 мм

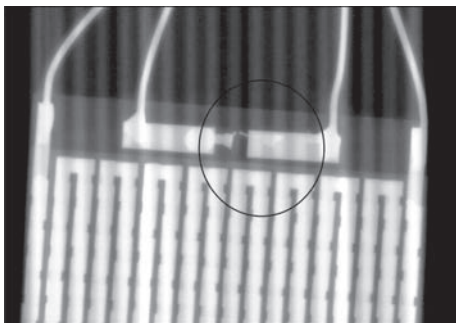


Рис. 15. Рентгенівське зображення нагрівального елемента на основі компонентів Пельтьє

отримання цифрового радіаційного зображення розміром 300×34 мм складає менше 3 хв.

Для диверсифікації напівфабрикатів з алюмінієво-магнієвих сплавів Д16, які використовуються при виробництві агрегатів в авіаційній промисловості, проведено дослідження можливості застосування рентгенотелевізійних методів неруйнівного контролю. На рис. 14 наведено результати просвічування зазначених виробів. Використову-

Таблиця 4. Параметри еталону чутливості ГОСТ 7512-82

Номер еталону	Глибина канавки h , мм					
	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5	h_6
1	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1

вався зразок труби діаметром 48 мм із штучними дефектами: свердлення діаметром 1 мм, штучна подряпина глибиною 0,1...0,2 мм.

Радіографічний режим: напруга на трубці $U = 60$ кВ, струм анода $I = 10$ мА, час формування (накопичення) зображення $t = 5$ с. Еталон чутливості №1 за ГОСТ 7512-82 (табл. 4).

Не менш цікаві можливості відкриваються для перевірки друкованих плат. Приклади застосування детектора S10811-11 для контролю друкованих плат і нагрівального елемента на основі компонентів Пельтьє наведено нижче.

На рис. 15 показано рентгенівське зображення нагрівального елемента на основі компонентів Пельтьє, який застосовується для підігріву сидіння в автомобілях. Електричні контакти нагрівального елемента видно у верхній частині рис. 15 праворуч та ліворуч. У таких нагрівальних елементах, крім компонентів Пельтьє, знаходиться також датчик температури з відповідними контактами, який розташований на рис. 15 зверху в центрі.

У результаті проведеного рентгенівського контролю виявлено дефект – обрив електричного провідника, який під'єднано до датчику температури (центр верхньої частини нагрівального елемента, рис. 16).

За допомогою детектора S10811-11 було проведено рентгенівський контроль друкованих плат ін-

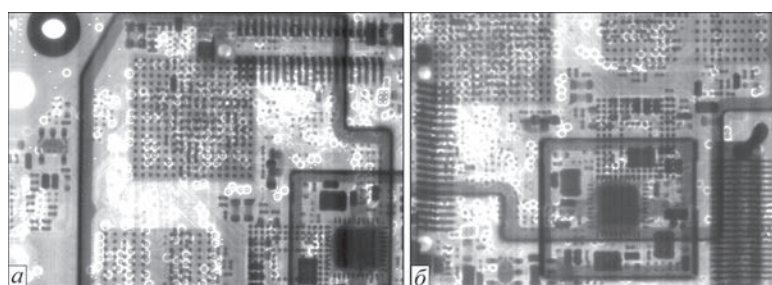


Рис. 16. Рентгенівські зображення різних ділянок друкованої плати телевізійної камери. У центрі темного квадрату розташована матриця відеосенсора

телевільної камери. На рис. 16 наведено рентгенівські зображення різних ділянок такої плати. Аналіз подібних зображень дозволяє виявити різні дефекти друкованих плат (замикання між доріжками, контактними площадками та виводами мікросхем, обрив доріжок тощо).

Висновки

1. Дослідно-промислові випробування підтвердили можливість створення скануючих рентгено-телевільних систем із використанням низькоформатних сенсорів, що дозволило суттєво (у кілька разів) зменшити їх вартість у порівнянні з аналогічними повноформатними плоскопанельними напівпровідниковими сенсорами.

2. Розроблено мікрокомп'ютерні засоби, які забезпечують бездротове дистанційне управління рентгено-телевільними системами НК.

3. Проведені виробничі дослідження скануючого детектора показали можливість виявлення внутрішніх дефектів розмірами до 0,1 мм.

4. Максимальна товщина рентгенівського контролю з використанням міні-сенсора S10811-11 – до 6 мм (алюміній).

Список літератури

1. Патон Б.Е., Троицкий В.А. (2013) Основные направления работ ИЭС им. Е.О. Патона по совершенствованию неразрушающего контроля сварных соединений. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 4, 13–29.
2. (2018) *Дефектоскопия XXI века. Основные направления работ ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины по развитию технологий неразрушающего контроля сварных соединений*. Троицкий В.А. (ред.) Киев, Изд-во ИЭС.
3. Троицкий В.А. (2021) *Технология и оборудование неразрушающего контроля качества. Введение в профессию*. Киев, Интерсервис.
4. Troitskiy V.A. (1997) Non-destructive testing of multilayer welded structures. *Insight*, 39, 9, 646–648, 651.
5. Troitskiy, V., Karmanov, M., Mikhailov, S., Pastovensky, R. (2016) *Experience of tangential radiographic inspection application for nuclear power facilities*. 19th WCNDT-2016, Munich, Germany.

6. *Industrial X-Ray Inspection Systems*. www.duerr-ndt.com/ndt-products.html
7. *X-Ray Detectors, X-Ray Detectors*. www.areximaging.com/solution_cat/x-ray-detectors-analytical-recycling
8. *CCD area image sensor S10811-11 – Hamamatsu Photonics*, www.hamamatsu.com
9. *DR 7 NDT Installation and Operating Instruction*. DÜRR NDT, www.duerr-ndt.de
10. Тройський В.О., Карманов М.М., Михайлов С.Р. та ін. (2020) Скануючі рентгенівські системи на основі мініатюрних твердотільних перетворювачів. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, 3, 43–47. <https://doi.org/10.37434/tdnk2020.03.06>
11. Тройський В.О., Карманов М.М., Шалаєв В.О. (2020) *Портативна система рентгено-телевільного контролю зварних з'єднань*. Патент України UA 145831 від 15.08.2020 р.

References

1. Paton, B.E., Troitskiy, V.A. (2013) Main directions of activity of E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU on improvement of nondestructive testing of welded joints. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, 4, 13–29 [in Russian].
2. (2018) *Flaw detection of 21st century. Main directions of activity of E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU on development of technologies of nondestructive testing of welded joints*. Ed. by V.A. Troitskiy. Kyiv, PWI [in Russian].
3. Troitskiy, V.A. (2021) *Technology and equipment of nondestructive quality testing. Introduction to the profession*. Kyiv, Interservice [in Russian].
4. Troitskiy V.A. (1997) Non-destructive testing of multilayer welded structures. *Insight*, 39(9), 646–648, 651.
5. Troitskiy, V., Karmanov, M., Mikhailov, S., Pastovensky, R. (2016) Experience of tangential radiographic inspection application for nuclear power facilities. In: Proc. of 19th WCNDT-2016, Munich, Germany.
6. *Industrial X-Ray Inspection Systems*. www.duerr-ndt.com/ndt-products.html
7. *X-Ray Detectors*. www.areximaging.com/solution_cat/x-ray-detectors-analytical-recycling
8. *CCD area image sensor S10811-11 – Hamamatsu Photonics*, www.hamamatsu.com.
9. *DR 7 NDT Installation and Operating Instruction*. DÜRR NDT, www.duerr-ndt.de.
10. Troitskiy, V.O., Karmanov, M.M., Mikhailov, S.R., Shalaev, V.O., Pastovensky, R.O. (2020) Scanning X-ray systems based on miniature solid-state transducers. *Tekh. Diahnost. ta Neruiniv. Kontrol*, 3, 43–47 [in Ukrainian]. DOI:<https://doi.org/10.37434/tdnk2020.03.06>
11. Troitskiy, V.O., Karmanov, M.M., Shalaev, V.O. *Portable system of X-ray TV testing of welded joints*. Pat. Ukraine UA 145831 of 15.08.2020 [in Ukrainian].

ACHIEVEMENTS OF THE E.O.PATON ELECTRIC WELDING INSTITUTE OF THE NAS OF UKRAINE IN THE FIELD OF X-RAY TV, ULTRASONIC AND OTHER NONDESTRUCTIVE TESTING METHODS (Review)

V.O. Troitskiy, M.N. Karmanov, S.R. Mikhailov

E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU, 11 Kazymyr Malevych str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: ndt@paton.kiev.ua

Effective monitoring of the state of critical structures requires continuous improvement of the methods of nondestructive testing (NDT). The E.O. Paton Electric Institute of NASU has traditionally been a leader in this field. Over the recent years, the E.O.Paton Institute has actively conducted work in the field of filmless radiography. For filmless radioscopic control of long-term objects a highly sensitive X-Ray TV detector was developed, which uses an inexpensive stomatological mini-sensor S10811-11 (Hamamatsu Photonics, Japan). Such a detector of extended objects should find wide application in wind, and nuclear power, aerospace industry and other branches, where there is a need to detect cracks with up to 20 ~m opening. The recent developments on tangential radiographing of gas distribution and household lines and other work in the field of monitoring hazardous facilities are presented. 11 Ref., 4 Tabl., 16 Fig.

Keywords: filmless radioscopic control, image stitching, portable detector, stomatological sensor, stomatological sensor, tangential radiographing

Надійшла до редакції 08.02.2022