

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Л.М. ЛОБАНОВ (головний редактор),

А.Я. Недосєка (заст. гол. ред.),

В.О. Троїцький (заст. гол. ред.),

Є.О. Давидов, С.А. Недосєка,

Ю.М. Посипайко,

І.Ю. Романова (відповід. секретар)

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України,
м. Київ

К. Драган

Технологічний інститут повітряних сил,
Варшава, Польща

Я. Грум

Люблянський університет, Словенія

М.Л. Казакевич

Інститут фізичної хімії ім. Л.В. Писаржевського
НАН України, м. Київ

О.М. Карпаш, П.М. Райтер

Івано-Франківський нац. техн. університет нафти і газу

Л.І. Муравський, З.Т. Назарчук, В.Р. Скальський,

В.М. Учанін

Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН
України, м. Львів

А.Г. Протасов, С.К. Фомічов

НТУ України «КПІ імені Ігоря Сікорського», м. Київ

А. Савін

Національний інститут досліджень та розробок з
технічної фізики, Ясси, Румунія

В.О. Стороженко

Харківський національний університет радіоелектроніки

Г.М. Сучков

Національний університет «Харківський політехнічний інститут»

В.О. Стрижало

Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка
НАН України, м. Київ

М.Г. Чаусов

Національний університет біоресурсів і
природокористування України, м. Київ

Засновники

Національна академія наук України,

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ,
Міжнародна Асоціація «Зварювання» (видавець)

Адреса редакції

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України

03150, Україна, м. Київ,

вул. Казимира Малевича, 11

Тел./факс: +38 (044) 200-82-77

E-mail: journal@paton.kiev.ua

www.patonpublishinghouse.com/ukr/journals/tdnk

Свідоцтво про державну реєстрацію

KB4787 від 09.01.2001

Журнал входить до переліку затверджених

Міністерством освіти і науки України видань
для публікації праць здобувачів наукових ступенів за

спеціальностями 132, 151, 152.

Наказ МОН України № 409 від 17.03.2020.

Передплата 2021

Передплатний індекс 74475.

4 випуски на рік (видається щоквартально).

Друкована версія: 960 грн. за річний комплект
з урахуванням доставки рекомендованою бандероллю.

Електронна версія: 960 грн. за річний комплект
(випуски журналу надсилаються електронною поштою

у форматі .pdf або для IP-адреси комп'ютера

передплатника надається доступ до архіву журналу).

За зміст рекламних матеріалів

редакція журналу відповідальності не несе.

ЗМІСТ

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

**ЛОБАНОВ Л.М., НЕДОСЄКА А.Я., НЕДОСЄКА С.А.,
ЯРЕМЕНКО М.А., ОВСІЄНКО М.А.** Проблеми технічної
діагностики та підходи до їх вирішення 3

**МІЛЕНІН О.С., ВЕЛИКОІВАНЕНКО О.А., РОЗИНКА Г.П.,
ПІВТОРАК Н.І.** Особливості аналізу технічного стану та
підтримки надійності магістральних газопроводів при
транспортуванні газоводневих сумішей (Огляд) 11

**СТОРОЖИК Д.В., ПРОТАСОВ А.Г., МУРАВЬОВ О.В.,
ПЕТРИК В.Ф., ПЕТРЕНКО Д.В.** Автоматизація процесу
теплого неруйнівного контролю шляхом застосування
методу комплексування термограм 20

ВИРОБНИЧИЙ РОЗДІЛ

УЧАНІН В.М. Аналіз роботи двоконтурного автогенера-
торного вихрострумowego дефектоскопа в режимі пере-
ривчастої генерації..... 24

ТРОЇЦЬКИЙ В.О., КАРМАНОВ М.Н., МИХАЙЛОВ С.Р.
Досягнення ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України в галузі
рентгенотелевізійного, ультразвукового та інших методів
неруйнівного контролю (Огляд)..... 35

БОНДАРЕНКО Ю.К., ЛОГІНОВА Ю.В. Використання
статистичних методів для підтримки необхідної якості
зварювальної продукції (Огляд) 44

RUCKER R. Таємниці Туринської плащаниці 54

ІНФОРМАЦІЯ

Дати, події, факти з історії технічного контролю 65

Видання журналу підтримують:

Українське товариство неруйнівного контролю та технічної діагностики,
Технічний комітет стандартизації «Технічна діагностика та неруйнівний контроль» ТК-78,
Асоціація «ОКО»

EDITORIAL BOARD

L.M. Lobanov (Editor-in-Chief),

A.Ya. Nedoseka (Deputy Editor-in-Chief),

V.O. Troitskiy (Deputy Editor-in-Chief),

Ie.O. Davydov, S.A. Nedoseka,

Yu.M. Posypaiko,

I.Yu. Romanova (execut. secretary)

E.O. Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine, Kyiv

Krzysztof Dragan

Air Force Institute of Technology, Warsaw, Poland

Janez Grum

University of Ljubljana, Slovenia

M.L. Kazakevich

L.V. Pisarzhevskii Institute of Physical Chemistry
of NAS of Ukraine, Kyiv

O.M. Karpash, P.M. Raiter

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

L.I. Muravsky, Z.Th. Nazarchuk, V.R. Skalskiy, V.M. Uchanin
Karpenko Physico-Mechanical Institute of NAS
of Ukraine, Lviv

A.G. Protasov, S.K. Fomichov

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv
Polytechnic Institute»

Adriana Savin

National Institute of R & D for Technical Physics,
Iasi, Romania

V.O. Storozhenko

Kharkiv National University of Radio Electronics, Ukraine

H.M. Suchkov

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
Ukraine

V.O. Stryzhalo

G.S. Pisarenko Institute for Problems
of Strength of NAS of Ukraine, Kyiv

M.G. Chausov

National University of Life and Environmental Sciences
of Ukraine, Kyiv

Founders

National Academy of Sciences of Ukraine,
E.O. Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine,
International Association «Welding» (Publisher)

Address

E.O. Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine
03150, Ukraine, Kyiv, 11 Kazymyr Malevych Str.

Tel./Fax: +38 (044) 200-82-77

E-mail: journal@paton.kiev.ua

www.patonpublishinghouse.com/eng/journals/tdnk

The Journal is included in the list of publications approved
by the Ministry of Education and Science of Ukraine
for the publication of works of applicants for academic degrees
in specialties 132, 151, 152.

Order of the MES of Ukraine № 409 of 17.03.2020.

Certificate of state registration
of KB 4787 dated 09.01.2001

Subscription 2021

Subscription index 74475.

4 issues per year (issued quarterly), back issues available.

\$72, subscriptions for the printed (hard copy) version,
air postage and packaging included.

\$60, subscriptions for the electronic version
(sending issues of Journal in pdf format
or providing access to IP addresses).

The editorial board is not responsible
for the content of the promotional material.

CONTENT

SCIENTIFIC AND TECHNICAL

**LOBANOV L.M., NEDOSEKA A. Ya., NEDOSEKA S.A.,
YAREMENKO M.A., OVSIENKO M.A.** Problems of technical
diagnostics and approaches to their solution 3

**MILENIN O.S., VELIKOIVANENKO O.A., ROZYNKA G.P.,
PIVTORAK N.I.** Features of analysis of the technical state
and support of reliability of the main gas pipelines at trans-
portation of gas-hydrogen mixtures (Review) 11

**STOROZHNIK D.V., PROTASOV A.G., MURAVIOV O.V.,
PETRIK V.F., PETRENKO D.V.** Automation of thermal
non-destructive testing process by applying the method of
complexing thermographs 20

INDUSTRIAL

UCHANIN V.M. Analysis of operation of a dual-circuit auto-
generator eddy current flaw detector in intermittent genera-
tion mode 24

TROITSKIY V.O., KARMANOV M.N., MIKHAILOV S.R.
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) 35

BONDARENKO Yu.K., LOGINOVA Yu.V. Use of statistical
methods to support the required quality of welded products
(Review) 44

RUCKER R. The mysteries of the Shroud of Turin 54

INFORMATION

Dates, events, facts in the history of technical
non-destructive testing 65

JOURNAL PUBLICATION IS SUPPORTED BY:

Ukrainian Society for Non-Destructive Testing and Technical Diagnostic,
Technical Committee on standardization «Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing» TC-78,
Association «OKO»

ПРОБЛЕМИ ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ ТА ПІДХОДИ ДО ЇХ ВИРІШЕННЯ

Л.М. Лобанов, А.Я. Недосека, С.А. Недосека, М.А. Яременко, М.А. Овсієнко

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: st_private@hotmail.com

Розглянуто принципові питання сучасної діагностики конструкцій відповідно до нового ДСТУ 9118:2022 «Технічна діагностика. Діагностування технічного стану матеріалів конструкцій. Загальні вимоги». Обґрунтовано теоретичні та практичні складові, необхідні для побудови сучасних діагностичних систем. Основний акцент зроблено на необхідності комплексного використання фундаментальних та інженерних досліджень. Указано на наявність ще не вирішених проблем на прикладі акустико-емісійної діагностики та окреслено напрямки подальшого розвитку та вдосконалення теоретичних основ технології оцінки стану конструкцій. Бібліогр. 6.

Ключові слова: стандарт, діагностика, метод акустичної емісії, аналітичні дослідження, експеримент, математичне моделювання, прогнозування

Вступ. У числі питань, що постають перед сучасною промисловістю, енергетикою та транспортом, забезпечення безпечної експлуатації та оцінка реального залишкового ресурсу конструкцій, вузлів та агрегатів займає одне з важливіших місць [1, 2]. Це пов'язано суттєвою мірою з тим, що значна частина об'єктів названих вище галузей відпрацювала свій плановий ресурс, деякі з них перевищили його у декілька разів і, тим не менш, продовжують експлуатуватися.

У якості прикладу науково обґрунтованих підходів до питань технічної діагностики розглянемо розробки в галузі методу акустичної емісії (АЕ). Даний метод заснований на явищах, що виникають у матеріалах при динамічній перебудові їх структури, яка відбувається переважно внаслідок впливу зовнішніх факторів, включаючи деформування конструкції робочими навантаженнями.

Відмінною особливістю АЕ технології є можливість оцінки стану конструкцій з наперед заданою точністю та ймовірністю (у системах безперервного моніторингу, що експлуатуються в даний час, ці показники при ймовірності певної події 0,95 дають похибку її оцінки $\pm 15\%$).

Технологія є унікальною, інноваційною та дозволяє:

- передбачити руйнівні навантаження, попереджати про небезпеку та запобігати аваріям, не припиняючи експлуатації;
- забезпечити великий фінансовий прибуток.

Діагностичне обладнання, встановлене на конструкції, дає змогу відстежувати її стан у будь-якій точці, яка має доступний для інтернету зв'язок із віддаленим центром контролю та аналізу.

Основні переваги:

- автоматизована оцінка ризику;
- онлайн передбачення руйнівного навантаження та залишкового ресурсу для конструкцій;
- повна автоматизація моніторингу та прогнозування;
- автоматизоване керування безпекою конструкції;
- проста інсталяція та інтеграція у промислові комп'ютерні мережі;
- використання стандартних мережевих протоколів і технологій.

Базовий варіант вказаної методики розроблено в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України (ІЕЗ). На її основі розвивається новий тип систем безперервного АЕ моніторингу.

Розроблено та впроваджено методи та інструменти для контролю безпеки споруд. Наразі системи безперервного АЕ моніторингу першого покоління працюють на деяких великих підприємствах України, наприклад, на чотирьох найбільших у Європі великотоннажних резервуарах (120 000 м³) та трубопроводах аміаку на Одеському припортовому заводі.

Джерела рентабельності створених систем безперервного АЕ моніторингу:

- скорочення простою виробництва;
- зниження кількості планових зупинок;
- запобігання аваріям;
- скорочення часу контролю;
- скорочення часу та витрат на пуск після випробування або ремонту;
- зниження витрат на оплату процедури контролю;

Лобанов Л.М. – <https://orcid.org/0000-0001-9296-2335>, Недосека А.Я. – <https://orcid.org/0000-0001-9036-1413>,
Недосека С.А. – <https://orcid.org/0000-0002-3239-381X>, Яременко М.А. – <https://orcid.org/0000-0001-9973-4482>,
Овсієнко М.А. – <https://orcid.org/0000-0002-2202-827X>

© Л.М. Лобанов, А.Я. Недосека, С.А. Недосека, М.А. Яременко, М.А. Овсієнко, 2022

- зниження витрат на прийняття рішення про стан конструкції;
- спрощення роботи контролюючого персоналу;
- зниження витрат на діагностичне обладнання;
- уніфікація процедури контролю для всього виробництва;
- зниження витрат на заміну обладнання та програмного забезпечення за рахунок уніфікації обміну даними;
- зниження витрат на навчання фахівців.

У зв'язку з цим слід вважати важливим публікацію у 2022 р. стандарту [3]¹, який встановлює основні положення з технічного діагностування, показники та характеристики діагностування, вимоги до діагностичного забезпечення об'єктів діагностування.

Згідно зі стандартом перерахуємо основні завдання технічної діагностики конструкцій:

- визначення поточного технічного стану;
- визначення місць, що можуть являти загрозу для безпечного функціонування об'єктів діагностування;
- прогнозування технічного стану.

Для здійснення технічного діагностування об'єкту необхідно:

- встановити показники та характеристики діагностування;
- забезпечити пристосованість об'єкту до технічного діагностування;
- розробити діагностичне забезпечення об'єкту.

Показники та характеристики діагностування, вимоги щодо пристосованості об'єкту до діагностування та діагностичного забезпечення об'єкту повинні включатися у технічні завдання та нормативно-технічну документацію, що розробляється у процесі проведення дослідно-конструкторських робіт.

Встановлюються такі показники діагностування:

- показники достовірності та точності діагностування;
- техніко-економічні показники.

Методи діагностування повинні визначатися, виходячи з встановлених завдань, і повинні включати в себе:

- діагностичну модель об'єкту;
- алгоритм діагностування та програмне забезпечення;
- правила вимірювання діагностичних параметрів;
- правила аналізу та обробки діагностичної інформації та прийняття рішення.

Розглянемо детально передумови та складові діагностування стосовно методу АЕ, які, відповідно до зазначеного стандарту, забезпечують кіль-

кісну оцінку стану об'єктів контролю з необхідними точністю та ймовірністю.

Діагностування поточного стану матеріалу конструкцій може проводитися руйнівними або неруйнівними методами контролю. До перших можна віднести випробування зразків-свідків або доведення до руйнування одного типового виробу з партії, на базі якого судять про стан інших. Основними недоліками руйнівних методів є вибірковість даних, погіршення поточного стану або повне руйнування конструкції. Неруйнівні методи контролю мають велику перевагу перед руйнівними, оскільки суттєво не впливають на стан конструкції та можуть бути використані багато разів або забезпечити постійний моніторинг стану конструкції на її робочих параметрах.

Незалежно від того, які методи контролю використовують, слід розуміти, що контроль є лише першою стадією діагностування. Результати контролю мають бути опрацьовані у тому сенсі, щоби отримати на виході кількісні показники поточного стану конструкції – прогнозоване руйнівне навантаження, несучу здатність, залишковий ресурс, тріщиностійкість або інші – із заданою точністю та ймовірністю.

Такі вимоги необхідні для забезпечення найвищої надійності результатів контролю, що, у свою чергу, вимагає застосування достатньо складних аналітичних методів, математичних досліджень високого рівня. Тому при розробці методик контролю дедалі ширше застосування отримують складні математичні моделі та втілення у практику результатів моделювання. Такий підхід дозволяє отримати нормовані значення параметрів, що характеризують показники експлуатаційної надійності та можливого руйнування матеріалів у певних межах похибок і при наперед заданій ймовірності їхньої появи. Таким чином, суттєвого значення набуває «інженерна» математика, зв'язування фізичних процесів, що протікають у матеріалах при руйнуванні, з математичними образами цих процесів. Таке поєднання дозволяє у деяких випадках суттєво спростити рішення та отримати задовільні результати у тих завданнях, які раніше просто не можна було вирішити. Реалізація розрахунків оптимально виконується за допомогою сучасної комп'ютерної техніки, а їх результати з достатньою для практики точністю дозволяють отримати показники працездатності із зазначеними характеристиками.

Метод АЕ є одним з найбільш ефективних неруйнівних методів, який має ряд серйозних переваг під час його використання у промислових умовах. До таких переваг відносяться, перш за

¹ Розробники – ІЕЗ та ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України.

все, можливість стовідсоткового контролю всього обсягу матеріалу конструкції, контроль великих поверхонь малим числом датчиків, діагностування конструкцій без зупинки виробництва, виключення громіздких гідровипробувань та заміна їх на пневмовипробування. Велике значення набуває можливість використання діагностичної апаратури на основі акустичної емісії для управління процесом виробництва в умовах передаварійних та аварійних ситуацій, що дозволяє своєчасно вживати заходів для попередження аварій, забезпечуючи експлуатацію конструкцій за фактичним станом. Це стало причиною вибору методу АЕ у якості предмету наукових досліджень з технічної діагностики та розробки на його основі нових методів оцінки стану матеріалів.

За словами академіка Б.Є. Патона, який був засновником розвитку цього напрямку в ІЄЗ, «стрімкий розвиток науки та технологій дає перспективу широкого застосування акустичної емісії для створення інтелектуальних конструкцій та споруд, які із заданою точністю та ймовірністю самі повідомлятимуть про свій стан та пропонуватимуть заходи виходу із скрутних ситуацій».

За більш ніж 40-річний період досліджень вдалося створити необхідні теоретичні та методичні підґрунтя для вирішення цієї задачі з наступних складових:

- Експериментальні дослідження.
- Аналітичні дослідження хвильових та температурних полів.
- Математичне моделювання процесів у деформованому матеріалі, виникнення та розвитку пошкоджень і відповідної цьому АЕ.
- Статистична обробка та розпізнавання образів, побудова алгоритмів прогнозування руйнування та залишкового ресурсу.
- Чисельне вирішення аналітичних задач, програмування внутрішнього та зовнішнього інтерфейсів систем АЕ контролю з необхідними характеристиками.

Одразу слід відзначити, що вказані складові є обов'язковими, виконувалися поруч одна з іншими. Вилучення хоча б однієї з цих складових призвело б до неможливості отримати необхідні наукові результати, які дозволили у кінцевому рахунку створити повністю автоматизовані системи промислового рівня, що заздалегідь розпізнають небезпечний стан матеріалу конструкцій, попереджають про рівень небезпеки, прогнозують руйнівне навантаження та залишковий ресурс з чіткими показниками точності та ймовірності. «Мозком» цих систем є програмне забезпечення, що алгоритмічно реалізує та втілює у життя ідеї авторів, «органами відчуття» є прилади, що отримують ін-

формацію від датчиків АЕ та технологічну інформацію (тиск, навантаження, температура тощо).

Експериментальні дослідження. Інформація, яку отримують прилади АЕ, є настільки ємною, багатопараметричною, швидко змінною у часі, що опрацювання її без сучасної комп'ютерної техніки є практично неможливим. Саме тому стрімкий розвиток досліджень у галузі АЕ і створення в різних країнах приладів для АЕ вимірювань припав на початок 21-го століття і продовжується сьогодні – комп'ютери попередніх поколінь не встигали обробляти величезні потоки даних. Зараз практично в усіх розвинених країнах світу є підприємства, що виробляють швидкодіючу АЕ апаратуру з більш-менш подібними характеристиками. Зростає кількість каналів, що паралельно обробляють інформацію з багатьох датчиків, пропонуються різні варіанти обробки сигналів, що фіксує АЕ обладнання.

Таким чином, на сьогодні існує практично уся необхідна база для проведення експериментів у галузі АЕ та запису АЕ інформації.

Але далі постає питання обробки цієї інформації, вилучення з неї корисної складової та проведення оцінки стану конструкцій, що контролюються. У західних країнах це питання постало порівняно недавно та отримало назву «Structural health monitoring», дослідження активізувалися, але чітких нормованих критеріїв кількісної оцінки стану конструкцій за даними випробувань, моніторингу конструкцій або моделювання руйнування досі не отримано. З відповідних профільних видань, наприклад, «Structural durability and health monitoring» чітко видно, що дослідження поки що носять локальний характер і спрямовані на пошук підходів до вирішення цієї проблеми [4, 5]. Причиною цього є саме той факт, що з поля зору дослідників випала проста річ – питаннями оцінки стану матеріалу за даними АЕ, проведенням досліджень і їх інтерпретацією повинні займатися фахівці в галузі міцності матеріалів у тісному контакті з акустиками, програмістами та приладобудівниками, у той час як світова практика йшла в іншому напрямку – відокремленість розробки апаратних засобів від потреб оцінки стану конструкцій. Тому основним досягненням, притаманним усім існуючим АЕ системам, є визначення координат джерел АЕ без чітких критеріїв подальшого аналізу даних, отриманих з відповідного джерела.

Фахівці з акустики та електроніки будували та продовжують будувати АЕ прилади, не маючи інформації, які саме дані потрібні для оцінки стану матеріалу. Фахівці у галузі міцності отримують вже готові прилади з певними параметрами та ма-

ють емпіричним шляхом визначати, як цими приладами користуватися для досягнення необхідного їм ефекту в оцінці стану матеріалів.

На відміну від цієї не зовсім вдалої практики, в ІЕЗ при розробці АЕ обладнання, проведенні експериментів, аналітичних дослідженнях та математичному моделюванні складних процесів, що відбуваються у матеріалах, поруч працювали фахівці у галузях міцності матеріалів, акустики, програмування та електроніки. У цьому ж сенсі можна позитивно відзначити роботу дослідників з Львівського Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України [6].

Саме завдяки тісній взаємодії фахівців різних напрямків вже у 2001 р. вдалося запустити на АТ «Одеський припортовий завод» у штатну експлуатацію першу в Україні систему безперервного моніторингу аміакосховища діаметром 52 м та висотою 21 м, яка не тільки відстежує поточний стан об'єкта, попереджаючи про можливу небезпеку, але й прогнозує руйнівне навантаження. Складне та оригінальне програмне забезпечення моніторингових систем (зараз вже декілька таких систем встановлено на різних підприємствах України, зокрема на Київських ТЕЦ) було б неможливо створити без попереднього проведення аналітичних досліджень і математичного моделювання. При цьому результати таких досліджень і моделювання перевірялися на основі накопичених за багато років експериментальних даних – отриманих як під час випробувань зразків, так і при безперервному моніторингу промислових об'єктів.

Знання, що отримувалися, починаючи з моменту створення першої діючої АЕ апаратури, призвели до поступового складання плану аналітичних досліджень та математичного моделювання, а далі до розширення можливостей обробки АЕ даних за рахунок розвитку програмного забезпечення.

Представимо вибірково перелік деяких ключових моментів щодо кожного з перерахованих пунктів досліджень, оскільки все, що було зроблене у даному напрямку, надати в рамках однієї статті неможливо.

Аналітичні дослідження хвильових і температурних полів. Розроблений аналітичний апарат вирішення складних диференціальних рівнянь, доповнений чисельним програмуванням, дозволив описати складні хвильові процеси у матеріалах, а потім підтвердити експериментально наступне:

1. Акустичні хвилі, які генерують дефекти, що виникають у матеріалі під час розвитку пошкоджень, мають широкий спектр, певна частина якого може розповсюджуватися на великі відстані, а швидкість руху може суттєво відрізнятися

від загальноприйнятих. Експеримент, проведений на трубі аміакопроводу, показав можливість реєстрації джерел АЕ на відстані, більшій за 720 м. Аналогічні експерименти на трубах, якими транспортуються інші рідини (вода, нафта) також показують можливість фіксувати сигнали АЕ на відстані до 1 км.

2. Пошкодження у матеріалі призводять до зміни його акустичних властивостей, а саме до зниження амплітуд і збільшення часу наростання сигналів АЕ. Цей експеримент був підтверджений скануванням за допомогою АЕ датчиків-випромінювачів зразків металевих і композитних матеріалів загальною кількістю більше за 300. Аналогічний результат дає математична модель пошкодженості (див. нижче).

3. Розрахунки показали, що при високих температурах дефекти у багатьох металах випромінюють АЕ під час їх розвитку. Експеримент підтвердив наявність АЕ під час деформування та руйнування зразків (зокрема сталі 15Х2МФА та 15Х1М1Ф, що використовуються у тепловій та атомній енергетиці) при високих температурах.

4. Підтверджено, що широкосмугові датчики типу АЕД-01 дозволяють отримувати найбільш інформативну складову акустичного сигналу. Багаторічні випробування зразків, конструкцій і безперервний моніторинг окремих з них підтвердили високу чутливість датчиків, яку у деяких випадках доводиться примусово обмежувати за рахунок апаратних та програмних фільтрів, оскільки інакше доводиться обробляти занадто великий потік інформації.

5. Показано, що групування сигналів АЕ у часі є більш інформативним для оцінки пошкодженості матеріалу, ніж форма та інші характеристики окремого сигналу. Експериментально це було підтверджено на базі випробувань близько сотні зразків. Як приклад, для сталі 20 випробування зразків, вирізаних із сусідніх ділянок пошкодженого матеріалу, дає принципово різну картину розподілу АЕ подій у часі. При цьому переріз зразків після розриву виглядає також неоднаково.

6. Залежність амплітуди сигналу АЕ від об'єму порожнини, що динамічно виникає в матеріалі, розраховано аналітично, у подальшому заклали до моделі накопичення пошкоджень.

Перераховані пункти щодо аналітичних досліджень дозволяють краще розуміти виникнення АЕ у деформованому матеріалі, але містять лише підґрунтя для оцінки стану матеріалу конструкцій за даними АЕ. Так, спроба створити еталони для розпізнавання стану матеріалу, базуючись лише на статистичному наборі випробуваних зразків, дала не повністю задовільні результати, оскільки

стало зрозумілим, що картина АЕ у матеріалі відображає з високою точністю розвиток полів пошкоджень, а у зразках (див. п. 5 вище) спостерігається суттєвий розбіг таких полів і відповідна їй картина розподілу подій АЕ у часі.

Для уніфікації еталонів пошкодженості було потрібно розробити модель виникнення АЕ у матеріалі, пов'язавши її з виникненням пошкоджень, а потім реалізувати розпізнавання поточного стану матеріалу.

Математичне моделювання процесів у деформованому матеріалі, виникнення та розвитку пошкоджень і відповідної цьому АЕ. Суттєву роль у розумінні складних процесів, що відбуваються в матеріалах під час накопичення пошкоджень і розвитку руйнування, зіграла співпраця з фахівцями Інституту проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України. Роботи, що проводилися під керівництвом академіка А.О. Лебедева і проф. М.Г. Чаусова (нині зав. кафедрою опору матеріалів у Національному аграрному університеті НАН України), стосувалися побудови повних діаграм деформування в умовах жорсткого навантаження і прецесійного дослідження процесів, що відбуваються у деформованому матеріалі на мікро- та макрорівнях. Поєднання проведення цих досліджень із застосуванням методу АЕ дозволило наочно виявити механізми виникнення АЕ при деформуванні та побудувати принципово нову модель накопичення пошкоджень, яка зокрема дозволяє за даними АЕ визначити поточну пошкодженість матеріалів.

Поштовхом для створення моделі стало комплексне дослідження матеріалів газопроводів України з різним строком експлуатаційного напруження. Визначення пошкодженості у залежності від строку напруження було виконане п'ятьма незалежними експериментальними методами: АЕ, скануванням імітатором АЕ сигналів, розсіянням мікротвердості, визначенням ударної в'язкості, зважуванням малих проб у рідині. Усі перераховані методи показали майже тотожні результати, що складаються у незначну похибку. Було доведено експериментально, що пошкодженість призводить до зростання внутрішнього об'єму порожнин у матеріалі. При цьому можна зафіксувати навіть зміну щільності матеріалу.

Таким чином, модель, що створювалася, мала пов'язати навантаження, виникнення, зростання та злиття порожнин у матеріалі, зміну при цьому акустичних властивостей матеріалу і виникнення сигналів акустичної емісії при кожному динамічному акті зміни внутрішнього стану матеріалу. Для зворотної перевірки у модель заклали також емпірично отримане рівняння пошкодженості, яке

дозволяло порівняти об'єм заданих моделлю пор з розрахунковим. Додатково модель перевіряли, закладаючи у неї не тільки структурний підхід (перекриття певної площини порою призводить до пропорційної зміни акустичних характеристик), а й дифракційний (для кожного такого перекриття розраховували дифракцію Фраунгофера, попередньо довівши, що саме вона має місце під час проходження акустичних хвиль крізь матеріал в умовах, які задавалися моделлю).

Особливістю моделі є відмова від використання традиційного методу скінченних елементів із заміною його об'єктно-орієнтованим моделюванням «розумних пор», тобто вся логіка зростання і взаємодії пор закладена в них усередині. Такий підхід дозволив вилучити вирішення складних рівнянь, що описують взаємодію елементів матеріалу на границях між ними, і сконцентруватися на умовах виникнення та поєднання пор при певних умовах. Це дозволило прискорити проведення віртуальних експериментів із накопичення пошкодженості у матеріалі та виникнення при цьому хвиль АЕ у багато разів, за рахунок чого кількість таких експериментів суттєво збільшилася, а це в свою чергу призвело до вдосконалення моделі.

Відзначимо, що подібний спосіб побудови моделі накопичення пошкоджень у інших авторів не знайдено.

Після створення та перевірки моделі на її базі отримали найбільш типові еталони пошкодженості та вже їх заклали в алгоритми розпізнавання стану матеріалу. Такі еталони, на відміну від отриманих на зразках, не прив'язані до конкретного матеріалу і досить складної форми зразка та добре показали себе під час розпізнавання поточного стану і прогнозування руйнування матеріалів.

Статистична обробка і розпізнавання образів, побудова алгоритмів прогнозу руйнування і залишкового ресурсу. Під час АЕ випробувань параметри, що реєструються, змінюються з величезною швидкістю. Роздільна здатність кожного АЕ каналу може складати, наприклад, 125 нс. Отримати при цьому повний, безперервно записаний сигнал АЕ, інакше кажучи, осцилограму, за 15 хвилин випробувань зразка важко навіть при одноканальному запису на найсучаснішій комп'ютерній техніці, оскільки по мірі накопичення даних швидкість їх обробки стрімко падає. Багатоканальний запис осцилограм призводить до гальмування роботи комп'ютера ще швидше. У той же час форма сигналу на вході АЕ обладнання залежить від такої кількості чинників, що не може бути без додаткової, надзвичайно складної оброб-

ки ототожнена з формою початкового сигналу, що випромінював дефект.

Тому на даному етапі розвитку електроніки і комп'ютерної техніки значно простіше брати в обробку не всю осцилограму, а певні її характеристики – час надходження, тривалість, максимум амплітуди, час наростання до максимуму амплітуди, кількість коливань (осциляцій) у сигналі. Навіть ці скорочені дані потребують швидкісної обробки. Слід сказати, що паралельно даним АЕ сучасні системи мають реєструвати технологічну, як правило, низькочастотну (НЧ) інформацію, бажано не один, а декілька параметрів, що характеризують процес навантаження зразка або експлуатації конструкції.

З перерахованих даних складається вектор, що постійно змінюється у часі та може бути охарактеризований як «Вектор Стану Матеріалу» (VSM). Статистична обробка інформації, що надходить під час АЕ випробувань, має формувати VSM таким чином, щоби можна було порівнювати його з еталонним, отриманим за допомогою попередніх досліджень зразків, або побудованим математичною моделлю.

Після визначення класифікаційних параметрів, що мають входити до VSM, у дію вступає класична схема розпізнавання образів. Вона працює значно швидше, ніж, наприклад, нейронні мережі, та придатніша для роботи з динамічною, різко змінюваною у часі інформацією. Методику розпізнавання образів давно розроблено, але основною проблемою при її використанні є саме підбір найважливіших класифікаційних ознак.

Під час розпізнавання VSM, що є саме набором класифікаційних ознак, опрацьовується шляхом знаходження найбільш відповідного еталону. Якщо при цьому виникає розбіжність, у дію вступає корекція, яку ще називають самонавчанням, що дозволяє динамічно, у реальному часі зблизити дані VSM і відповідного еталону. Оскільки еталони містять дані щодо відсотка поточного для еталону навантаження відносно руйнівного, приймається гіпотеза, що і для реальних даних АЕ та НЧ на поточний момент розпізнавання такий відсоток співпадає. Це і є прогнозом руйнівного навантаження у дії. Далі залишається задати, який відсоток від руйнівного навантаження являє певний рівень небезпеки, що у результаті дає класифікацію ступеня небезпеки під час АЕ випробувань зразків або конструкцій.

Реалізований у системах АЕ діагностики типу ЕМА прогноз руйнівного навантаження перевірено на сотнях зразків плоского та круглого перерізу, зі зварними швами та без них, які руйнували у принципово різних умовах навантаження і темпе-

ратур. Також зруйновано декілька трубно-оболонкових конструкцій під час планових випробувань, що передбачали руйнування.

Алгоритми прогнозу та попередження про небезпеку реалізовані у програмному забезпеченні (ПЗ) для систем АЕ діагностики типу ЕМА. Результати їх роботи дають підґрунтя для оцінки залишкового ресурсу. Оцінку цього параметру може бути виконаною лише за результатами моніторингу конструкцій протягом певного часу. Найгіршим з точки зору точності є набір даних для двох точок у часі, наприклад, для матеріалу у стані поставки та для нього ж після певного часу експлуатації. Екстраполяція за двома точками дає приблизний та занижений результат, тому на практиці використовують паралельно два різних підходи, вибираючи з розрахованого ресурсу найменший.

Перший підхід базується на описаних вище експериментах з оцінки пошкодженості досить широкого набору металевих матеріалів п'ятьма різними методами. Отримані дані дозволили будувати номограми для визначення залишкового ресурсу на основі визначеної будь-яким методом пошкодженості.

Другий підхід оснований на відстежуванні прогнозу руйнівного навантаження під час експлуатації промислових об'єктів, обладнаних системами моніторингу типу ЕМА. Прогноз руйнівного навантаження коливається в часі, у залежності від поточних умов експлуатації конструкції. Екстраполяція прогнозованої кривої у бік майбутнього дає можливість побудувати криву залишкового ресурсу на основі лінії тренду прогнозованих даних.

Далі залишається вибрати найгірше з отриманих значень прогнозованого ресурсу та прийняти за основне. Важливо відзначити, що перевірка розрахунку ресурсу може бути лише приблизною, оскільки реальний ресурс вичерпується після руйнування конструкції, а основною метою діагностики є протилежна мета – не допустити руйнування.

Чисельне вирішення аналітичних задач, програмування внутрішнього і зовнішнього інтерфейсів систем АЕ контролю із необхідними характеристиками. Вихідним продуктом аналітичних досліджень у галузі АЕ мають бути вельми складні рішення диференціальних рівнянь. Як правило, напругу ці рівняння вирішити надзвичайно важко або взагалі неможливо із застосуванням сучасного математичного апарату. Тут на допомогу стає використання, по-перше, інженерного підходу до вирішення таких задач, по-друге, чисельне вирішення на комп'ютері отриманих кінцевих інтегральних рівнянь. Інженерний під-

хід дозволяє спростити процес вирішення аналітичних задач, додавши до нього певні обмеження, що диктуються здоровим глуздом і вже отриманими результатами фізичних експериментів. Це дозволяє у багатьох випадках замінити змінні величини константами, накласти додаткові граничні та початкові умови, які суттєво спрощують процес рішення. Незважаючи на це, кінцеве рішення частіше за все виконується чисельним шляхом, оскільки точне аналітичне рішення подвійних або потрійних інтегралів можна отримати далеко не завжди. Тут програмування починає грати величезну роль, оскільки, по-перше, автоматизує розрахунок і дозволяє отримати рішення у широкому діапазоні вхідних даних; по-друге, дає можливість легко знайти та виправити помилки, які можна випадково допустити у складних розрахунках; по-третє, дозволяє візуально представити результати розрахунків у вигляді таблиць, графіків необхідного формату, у тому числі в динаміці. Більшість задач було вирішено саме таким чином.

Паралельно з вирішенням аналітичних задач виконувалося та продовжує виконуватися створення і модернізація ПЗ для комп'ютеризованих систем АЕ діагностики. Переламним моментом у розвитку ПЗ стало створення у кінці 90-х років 20 ст. програм для систем ЕМА третього покоління. Вони отримали відразу декілька принципово нових, порівняно з попередніми, можливостей, які змінили як взаємодію з АЕ обладнанням, так і обробку даних АЕ вимірювань:

1. Перехід на 32-х-розрядні багатозадачні операційні системи Windows дозволив виконувати у рамках однієї програми одночасне виконання завдань з отримання даних, налаштування параметрів вимірів, обробку та виведення на екран результатів у реальному часі.

2. Уперше запропоноване для систем типу ЕМА використання мережевих протоколів TCP/IP і UDP дозволило інтегрувати постійно діючі АЕ системи у внутрішню мережу підприємств, організувати взаємодію між ними, віддалений доступ і керування через мережу Інтернет, захистити життя та здоров'я оператора за рахунок його віддалення від об'єкту контролю. Зараз такий спосіб роботи поступово стає стандартним у світовій практиці.

3. Забезпечено можливість роботи програм типу ЕМА з АЕ приладами різних моделей і виробників (ЕМА-2, 3, 4, Галс-1), незважаючи на відмінність протоколу обміну і структур даних, що опрацьовуються, за рахунок внутрішньої модульної структури і використання поліморфних класів. Можливе достатньо просте розширення переліку АЕ приладів, з якими програма зможе працювати.

4. Прийняте свого часу рішення щодо постійної модернізації ПЗ ЕМА показало свою ефективність, оскільки дозволяє, по-перше, реалізовувати найновіші ідеї і досягнення у даній галузі, по-друге, швидко відгукуватися на вимоги промислових підприємств, що експлуатують дані системи. Зокрема на замову були створені сервісні програми, що забезпечують надійну роботу систем типу ЕМА на виробництві та взаємодію кількох систем у рамках однієї мережі, накопичують статистику попереджень і небезпечних ділянок об'єктів моніторингу.

5. Спеціальні програми забезпечують інтеграцію з Microsoft Office, дозволяючи автоматично отримувати відформатовані та готові для друку звіти, протоколи, таблиці та графіки, а також, за необхідності, додавати користувачеві власні алгоритми обробки отриманих даних.

6. Створено програми, що обробляють статистику попереджень і прогнозу руйнування за вибраний час – від кількох годин до кількох років, із побудуванням таблиць і графіків, які полегшують аналіз небезпечних моментів і небезпечних ділянок під час експлуатації об'єктів безперервного моніторингу.

7. Розроблено систему надання на основі статистики моніторингу так званої «Нормованої інтелектуальної поради», яка реалізована у спеціальному ПЗ (поки що працює лише на АТ «Одеський припортовий завод») і надає операторам рекомендації у разі виникнення небезпечних ситуацій відповідно до нормативної документації.

Таким чином, ідею Б.С. Патона щодо перспектив інтелектуальних конструкцій можна вважати у значній мірі втіленою у практику.

Незважаючи на це, слід вказати, що багато питань АЕ діагностики потребують подальших математичних і експериментальних досліджень, зокрема відновлення початкової форми та параметрів сигналу від джерела АЕ на основі даних, отриманих апаратурою, детальний аналіз розподілу АЕ параметрів і його вдосконалення, оцінка стану конструкцій за даними АЕ з конструкцій з обмеженим доступом, програмне керування процесом виробництва на основі даних діагностування та багато інших.

Відповідно до сказаного вище, слід звернути увагу на ширше та глибше використання аналітичних методів при вирішенні задач оцінки зміни стану матеріалів конструкцій у процесі їх експлуатації. При цьому основний акцент необхідно зробити на комплексному використанні фундаментальних та інженерних досліджень, оскільки основу сучасної АЕ діагностики становлять прив'язані до її конкретних завдань математичні дослідження у галузі міцності ма-

теріалів, на базі результатів яких вирішують питання у галузях акустики, програмування та приладобудування.

Висновки

1. Технічне діагностування конструкцій методом АЕ має спиратися на результати фундаментальних досліджень, які включають аналітичні розрахунки, математичне моделювання, статистичну обробку даних і розпізнавання образів. Кожна з цих складових повинна мати експериментальне підтвердження.

2. Результатом діагностування мають бути кількісні показники стану конструкції, що діагностується, отримані із заданою точністю та ймовірністю.

3. Вимірювальна АЕ апаратура, навіть найвищої якості, сама по собі не забезпечує технічного діагностування об'єктів контролю. Вона дозволяє лише отримати дані випробувань або моніторингу конструкцій, тобто забезпечує їх початковий неруйнівний або руйнівний контроль.

4. Завдання оцінки стану конструкцій, тобто їх діагностики, вирішують інтелектуальні технології, закладені у програмне забезпечення, що обробляє інформацію з АЕ приладів.

5. Для успішного вирішення завдань АЕ діагностики питаннями оцінки стану матеріалу, проведенням досліджень та їх інтерпретацією повинні займатися фахівці в галузі міцності матеріалів у тісному контакті з акустиками, програмістами та приладобудівниками.

6. Сучасні досягнення АЕ діагностики забезпечують у перспективі можливість програмного керування безпекою процесу виробництва на основі даних моніторингу задіяних у цьому процесі конструкцій.

7. Запропоновані складові досліджень у галузі АЕ діагностики можуть бути достатньо ефективно використані при розробці інших існуючих

методів діагностування стану матеріалів конструкцій.

Список літератури

1. Патон Б.Е., Лобанов Л.М. Недосека А.Я. и др. (2012) *Акустическая эмиссия и ресурс конструкций: Теория, методы, технологии, средства, применение*. Киев, Индпром.
2. Недосека А.Я., Недосека С.А. (2020) *Основы расчета и диагностики сварных конструкций: Учебное пособие*. 5-е изд., перераб. и доп. Патон Б.Е. (ред.). Киев, Индпром.
3. ДСТУ 9118:2022. *Технічна діагностика. Діагностування технічного стану матеріалів конструкцій. Загальні вимоги*.
4. Amirabbas Haidarpour, Kong Fah Tee (2020) Finite Element Model Updating for Structural Health Monitoring. *Structural Durability & Health Monitoring*, 14, 1, 1–17. DOI: <https://doi.org/10.32604/sdhm.2020.08792>
5. Junyu Chen, Yunwen Feng, Cheng Lu, Chengwei Fei (2021) Fusion Fault Diagnosis Approach to Rolling Bearing with Vibrational and Acoustic Emission Signals. *CMES-Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 129, 2, 1013–1027. DOI: <https://doi.org/10.32604/cmescs.2021.016980>
6. Назарчук З.Т., Скальський В.Р. (2009) *Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій. Науково-технічний посібник. У 3-х томах*. Київ, Наукова думка.

References

1. Paton, B.E., Lobanov, L.M., Nedoseka, A.Ya. et al. (2012) *Acoustic emission and service life of structures: Theory, methods, technologies, means, application*. Kyiv, Indprom [in Russian].
2. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A (2020) *Fundamentals of calculation and diagnostics of welded structures: Manual*. 5th Ed. by B.E. Paton. Kyiv, Indprom [in Russian].
3. DSTU 9118:2022. *Technical diagnostics. Diagnostics of technical state of structure materials. General requirements* [in Ukrainian].
4. Amirabbas Haidarpour, Kong Fah Tee (2020) Finite element model updating for structural health monitoring. *Structural Durability & Health Monitoring*, 14(1), 1–17. DOI: <https://doi.org/10.32604/sdhm.2020.08792>
5. Junyu Chen, Yunwen Feng, Cheng Lu, Chengwei Fei (2021) Fusion fault diagnosis approach to rolling bearing with vibrational and acoustic emission signals. *CMES-Computer Modeling in Engineering & Sci.*, 129(2), 1013–1027. DOI: <https://doi.org/10.32604/cmescs.2021.016980>
6. Nazarchuk, Z.T., Skalskyi, V.R. (2009) *Acoustic emission diagnostics of structural elements: STI Refer. book*. In: 3 vol. Kyiv, Naukova Dumka [in Ukrainian].

PROBLEMS OF TECHNICAL DIAGNOSTICS AND APPROACHES TO THEIR SOLUTION

L.M. Lobanov, A.Ya. Nedoseka, S.A. Nedoseka, M.A. Yaremenko, M.A. Ovsienko

E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU, 11 Kazymyr Malevych str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: st_private@hotmail.com

The paper deals with principal issues of modern diagnostics of structures in keeping with the new DSTU 9118:2022 «Technical diagnostics. Diagnosing the technical condition of structure materials. General requirements». Theoretical and practical components were substantiated, which are required to build modern diagnostic systems. The new emphasis is on the need for a comprehensive use of fundamental and engineering studies. Presence of yet unsolved problems is shown in the case of acoustic-emission diagnostics, and directions of further development and improvement of theoretical fundamentals of the technology of assessment of the state of structures are outlined. 6 Ref.

Keywords; standard, diagnostics, acoustic emission method, analytical studies, experiment, mathematical modeling, prediction

Надійшла до редакції 07.04.2022

ОСОБЛИВОСТІ АНАЛІЗУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ТА ПІДТРИМКИ НАДІЙНОСТІ МАГІСТРАЛЬНИХ ГАЗОПРОВОДІВ ПРИ ТРАНСПОРТУВАННІ ГАЗОВОДНЕВИХ СУМІШЕЙ (Огляд)

О.С. Міленін, О.А. Великоіваненко, Г.П. Розинка, Н.І. Півторак

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: asmilenin@ukr.net

Проведено аналітичний огляд особливостей експлуатації, експертного аналізу технічного стану та підтримки надійності магістральних газопроводів при транспортуванні ними сумішей природного газу та водню. На основі сучасних уявлень про водневу деградацію трубних сталей розглянуто умови, необхідні для безпечного використання для цього існуючої газотранспортної системи, в тому числі, за різної концентрації водню в суміші. Сформульовано додаткові вимоги щодо оцінки припустимості типових дефектів та порядку їх усунення методами зварювання під тиском. Бібліогр. 33, табл. 2, рис. 4.

Ключові слова: газоводнева суміш, магістральний газопровід, воднева деградація, технічний стан, надійність, ремонт

Вступ. Використання водню та інших відновлювальних газів як засобу передачі енергії від віддалених джерел (перш за все, сонячних і вітрових електростанцій, станцій переробки біоматеріалів тощо) набуває наразі все більшого поширення, зокрема в рамках прийнятої Європейською Комісією «Водневої стратегії ЄС до 2050 року» [1]. Це обумовлено низкою факторів економічного, екологічного та технологічного характеру, в тому числі, інтенсивним розвитком «зеленої» енергетики. Так, використання «зелених» технологій для видобутку електроенергії пов'язане з певною локалізацією енергогенеруючих потужностей у залежності від їх типу (місця встановлення сонячних панелей великої площі, вітрогенераторів тощо), що вимагає розв'язання задачі транспортування

виробленої електроенергії до загальних мереж. Побудова нових ліній електропередач потребує суттєвих фінансових витрат, що підвищує загальну собівартість «зеленої» енергії. Тому одним із можливих шляхів її передачі до кінцевого споживача є використання розгалуженої системи газопроводів для транспортування, перш за все, «зеленого» водню, отриманого шляхом електролізу води або інших його типів, показаних на рис. 1 [2, 3]. Такий підхід є раціональним із позиції більшої ефективності передачі енергії при транспортуванні водню трубопроводами, збільшення частки відновлювальної енергетики в загальному обсязі енергогенеруючих потужностей, зменшення залежності промисловості від викопних вуглеводнів, зокрема природного газу [4].



Рис. 1. Приклад класифікації водню за методами його промислового виробництва [2]

Міленін О.С. – <https://orcid.org/0000-0002-9465-7710>

© О.С. Міленін, О.А. Великоіваненко, Г.П. Розинка, Н.І. Півторак, 2022

Проте безпосереднє використання газотранспортної системи (ГТС) для транспортування водню пов'язане з підвищенням ризиків аварійних ситуацій, тому що проектні умови магістральних та розподільчих трубопроводів з точки зору вибору матеріалів, умов експлуатації, порядку технічного обслуговування не враховують великої концентрації цього елемента в транспортованому газі. З метою використання існуючої ГТС для транспортування водню без суттєвих змін у конструкціях трубопроводів раціональним є використання сумішей природного газу та водню [5–7]. За певного вибору концентрації водню в такій газозводневій суміші (ГВС) негативний вплив водню на міцність та працездатність трубопроводів може бути припустимим. Проте при виборі як експлуатаційних параметрів, так і порядку проведення технічної діагностики, аналізу технічного стану, підтримання працездатності та гарантування надійності ГТС необхідно враховувати не тільки матеріалознавчі аспекти впливу водню на матеріал магістральних газопроводів (МГ), але й використовувати відповідні підходи механічної інженерії, які дозволяють врахувати характерні особливості стану конструкційних елементів магістральних трубопроводів при транспортуванні ними ГВС у контексті відповідних стандартів і норм.

Метою даного огляду є узагальнення даних про особливості експлуатування, аналізу та підтримки технічного стану та працездатності МГ при транспортуванні сумішей природного газу та водню.

Особливості впливу водню на матеріал магістральних газопроводів. Відомо, що сталь підземного газопроводу може бути гідрогенізованою як із зовнішньої поверхні труби в області пошкодження захисної ізоляції через корозійну дію ґрунту, так і з внутрішньої – через електрохімічну взаємодію з конденсованою вологою, що містить водень, або в результаті дисоціації газоподібного водню [8]. Прикладні аспекти негативного впливу водню на механічні властивості металів і конструкцій довготривалої експлуатації є предметами постійної уваги як експлуатуючих організацій різних галузей промисловості, так і науково-дослідних груп по всьому світу. Це дозволило виявити та узагальнити характер водневого пошкодження типових трубних сталей, хоча залишається певне недостатнє розуміння його механізмів [9]. Так, воднева деградація властивостей сталей залежить від їх міцності. Високоміцні сталі більш схильні до впливу водню, ніж маломіцні, при цьому зміна пружних властивостей незначна, проте пластичність, параметри опірності різним видам руйнування (гранична міцність на розрив, в'язкість

руйнування, порогове значення коефіцієнта інтенсивності напружень, швидкість зростання втомних тріщин) можуть погіршуватися зі збільшенням концентрації водню [10].

Відомо, що інтегральна концентрація дифузійного водню є певною мірою якісним показником стану наводнення матеріалу, бо більш важливою є локалізована концентрація на вершині вже існуючих дефектів несучільності матеріалу, де атомарний водень може рекомбінувати до молекулярного стану [11]. У результаті рекомбінації всередині пасток формується високий локальний гідростатичний тиск, що призводить до збільшення внутрішніх мікронапружень. Це викликає формування та розвиток як розподіленої пошкодженості матеріалу, так і макродефектності за різними механізмами [12–14]: водневе розтріскування під напруженням (HSC); формування воднево-індукованих тріщин (HIC/HAC); сповільнене водневе руйнування (SOHIC); розтріскування м'якої зони (SZC); ступінчасте розтріскування (SWC); сульфідне розтріскування під напруженням (SSC); формування блістерів; корозійне розтріскування під напруженням (SCC).

Характер і масштаб негативного впливу водню залежать від різних факторів, включаючи хімічний склад сталі труб, розподіл і морфологію фаз, структуру зерна, сегрегацію та розподіл легуючих елементів і домішок. Тому для оцінки надійності елементів МГ в умовах транспортування ГВС необхідно окремо враховувати вплив надлишкової наводненості металу монтажних зварних швів (МШ) та зони термічного впливу (ЗТВ) на граничний стан трубопроводу за умов проектного навантаження. Як показали результати експериментальних досліджень зразків з МШ, ЗТВ і основного металу трубних сталей за різного ступеня наводнення, найбільш вразливим до негативного впливу водню є метал ЗТВ, де формується крупнозерниста стовпчаста структура [15]. При цьому найбільша деградація спостерігається для втомних характеристик металу ЗТВ, що необхідно враховувати при визначенні можливості та умов транспортування ГВС конкретними ділянками ГТС.

Окремим явищем, яке є характерним для конструкцій тривалої експлуатації при транспортуванні речовин, що містять водень, є накопичення розсіяного пошкодження матеріалу [16, 17]. Процес накопичення такого типу пошкодження (старіння металу) прийнято розділяти на декілька етапів [18]. На I етапі старіння, міцність і твердість металу збільшуються, а характеристики пластичності та опірності крихкому руйнуванню зменшуються. На II етапі для визначення характеристик пластичності матеріалу слід враховувати його

фактичний нетто-переріз, оскільки на отримуваних результати лабораторних досліджень істотно впливає розкриття множинних мікрodefektів під час розтягуючого навантаження, що призводить до похибки у визначенні істинної пластичності. З цієї ж причини можуть знижуватись міцність і твердість матеріалу.

Характерні проблеми в забезпеченні надійності магістральних трубопроводів при транспортуванні сумішей водню та природного газу. Вимоги до умов експлуатації існуючої ГТС України базуються на комплексі стандартів і норм, що регламентують різні аспекти проектування, аналізу технічного стану та порядку обслуговування трубопроводів. Перепрофілювання магістральних трубопроводів систем для транспортування ГВС потребує врахування особливостей впливу підвищеної концентрації водню на експлуатаційні характеристики елементів ГТС. Так, відомо, що висока текучість водню, з одного боку, підвищує енергетичну ефективність прокачування ГВС, з іншого, обумовлює зростання ризику витоку транспортованого газу [19]. З точки зору управління цілісністю магістральних трубопроводів прийнято розглядати наступні причини появи локального витоку [20]: корозійне пошкодження; дефектність матеріалу; дефектність технологічної природи; помилки при проектуванні чи експлуатаванні; розподілене навантаження; інше навантаження; несправність обладнання; інше.

Як видно з результатів розрахунку коефіцієнта ризику (по різним матеріалам трубопроводів) та сумарного ризику (враховуючи ймовірність настання критичної ситуації) аварійної ситуації через витік транспортованої ГВС із різним об'ємним вмістом водню (0...50 %) (табл. 1), найбільші ризики мають місце в області корозійних пошкоджень і технологічних дефектів (вм'ятин, зги-

нів, гофрів тощо) [21]. Технологічні дефекти, що з'являються, зокрема, при спорудженні чи технічних роботах на окремих ділянках трубопроводів у відкритому шурфі, практично не змінюються в процесі експлуатації трубопроводу, на відміну від корозійних пошкоджень, які є характерними для ГТС України в силу її загальної зношеності. Тому збільшення відповідних ризиків на 15...20 % (при концентрації водню до 20 %) має бути обґрунтованим додатковими розрахунками ризиків настання граничного стану конкретних ділянок трубопроводів із виявленими дефектами корозійних стоншень як на момент проведення діагностики, так і за умови розвитку дефектності в процесі подальшого експлуатування МГ. Надлишкова міцність ділянки трубопроводу з корозійними пошкодженнями має бути достатньою, для того щоб компенсувати відповідне збільшення ризиків при транспортуванні ГВС. Слід зазначити, що наведені розрахунки враховують різні типи матеріалу трубопроводів (трубна сталь, полімери тощо), тому стосовно української ГТС ці показники необхідно розглядати більше як якісні. Проте вони показово відображають вплив водню різної концентрації в складі ГВС на схильність магістральних трубопроводів до руйнування через витік.

Той факт, що більшість магістральних трубопроводів прокладено під землею, певною мірою зменшує можливі наслідки витоку газу чи ГВС, але при аналізі можливості використання окремих ділянок існуючої ГТС необхідно враховувати розташування трубопроводів відносно інших інфраструктурних об'єктів, таких, як житлові будинки, мости, автомобільні чи залізничні шляхи, мережі електропостачання тощо. Будівельні норми [22], в яких сформульовано вимоги до прокладання магістральних трубопроводів, містять залежності відстані від вісі трубопроводу

Таблиця 1. Розрахунковий ризик руйнування МГ в залежності від природи руйнування та складу газоводневої суміші [21]

Причини аварії	Ймовірність, (%)	Коефіцієнт ризику (%)				Сумарний ризик (%)			
		Природний газ	< 20% H ₂	20...50% H ₂	>50% H ₂	Природний газ	<20% H ₂	20...50% H ₂	>50% H ₂
Корозійне пошкодження	36,42	24,54	29,54	29,54	44,54	8,94	10,76	10,76	16,22
Дефектність матеріалу	6,98	34,16	39,16	39,16	54,16	2,38	2,73	2,73	3,78
Розподілене навантаження	8,47	25,58	35,58	35,58	45,58	2,17	3,01	3,01	3,86
Дефектність технологічної природи	15,39	50,00	60,00	70,00	70,00	7,69	9,23	10,77	10,77
Інше навантаження	1,86	10,00	15,00	15,00	30,00	0,19	0,28	0,28	0,56
Несправність обладнання	6,75	30,00	35,00	35,00	50,00	2,02	2,36	2,36	3,37
Помилки при проектуванні чи експлуатаванні	2,53	30,00	35,00	35,00	50,00	0,76	0,89	0,89	1,27
Інше	21,60	10,00	15,00	15,00	30,00	2,16	3,24	3,24	6,48
Загалом	100,00	214	264	274	374	26	33	34	46

до об'єкта певного типу в залежності від діаметра трубопроводу та його класу (див. приклад табл. 2). Але природно очікувати, що фатальні наслідки загоряння чи вибуху ГВС (перш за все, людські жертви) вищі, ніж у випадку природного газу, тому необхідно сформулювати більш жорсткі умови щодо взаємного розташування магістральних чи розподільчих газопроводів та інших об'єктів чи споруд.

Як показали наявні результати досліджень ризику фатальних наслідків вибуху ГВС з різною концентрацією водню [21], характерною особливістю є збільшення ризиків від аварійних ситуацій при більшій локалізованості високих ризиків до безпосереднього місця витоку. Так (як показано на рис. 2) на відстані близько 265 м від вісі трубопроводу з витоком ГВС ризики фатальних наслідків займання фактично не залежать від концентрації водню та дорівнюють такій для природного газу, а при більших відстанях висока летучість водню навіть зменшує відповідні ризики. Але для менших відстаней необхідно вводити додаткові поправки до існуючих вимог [22]. Ця додаткова поправка до відстані для концентрації водню в ГВС до 25 % складає близько 100 м, а при 50 % водню – близько 150 м. У разі, якщо на певних ділянках трубопроводів розташування інфраструктурних об'єктів не задовольняє таким більш жорстким умовам, безпосереднє використання цих ділянок для транспортування ГВС без попереднього перенесення трубопроводу чи захисту відповідних об'єктів неприпустиме. Ці ж висновки необхідно застосовувати для паралельних ниток трубопроводів, що розташовані в безпосередній близькості одна від одної, а також при плануванні прокладання нових МГ вздовж вже існуючих.

Окрема увага має бути приділена трубопроводам, де можливе втомне руйнування, а саме: ділянкам на виході з компресорних станцій, підземним, підводним чи надземним переходам через природні та штучні перешкоди тощо. Відомо, що

Таблиця 2. Приклад нормативних відстаней від вісі підземних газопроводів до різних об'єктів в залежності від класу та діаметра труб [22]

Об'єкти, споруди, будівлі	Мінімальна відстань від вісі газопроводу, м							
	Клас трубопроводу							
	I						II	
	Умовний діаметр труби, мм							
	< 300	300...600	600...800	800...1000	1000...1200	1200...1400	≤ 300	> 300
Міста та інші населені пункти; окремі промислові підприємства; окремі будівлі з масовим скупченням людей; аеропорти	100	150	200	250	300	350	75	125
Території газорозподільних станцій	50	75	100	125	150	175	50	75
Гирла нафтових, газових та артезіанських свердловин	30	50	100	150	175	200	30	50
Залізничі загальної мережі	75	125	150	200	225	250	75	100

в умовах підвищеної концентрації водню відбувається зростання схильності матеріалу до спонтанного розвитку втомних тріщин [23]. Тому для використання цих ділянок МГ для транспортування ГВС необхідним є зменшення періоду контролю їх технічного стану з метою виявлення появи тріщиноподібних дефектів. Особливо це стосується місць монтажного та ремонтного зварювання, де додаткові розтягувальні залишкові напруження в області шва та ЗТВ зумовлюють підвищену схильність до зародження тріщин за умов зовнішнього циклічного навантаження.

Відповідно до вимог [22] магістральні трубопроводи та їх ділянки поділяються на категорії в залежності від умов прокладання, типорозмірів труб і експлуатаційних параметрів. У залежності від категорії конкретної ділянки (В, I, II, III, IV) визначаються коефіцієнти запасу умов експлуатації при розрахунках на міцність і стійкість, норми кількості зварних з'єднань, що підлягають неруйнівному контролю, параметри випробувань тощо. Для гарантування відповідної надійності трубопроводів при транспортуванні ГВС категорійність окремих ділянок має бути змінена. Зокрема це стосується повітряних переходів і переходів

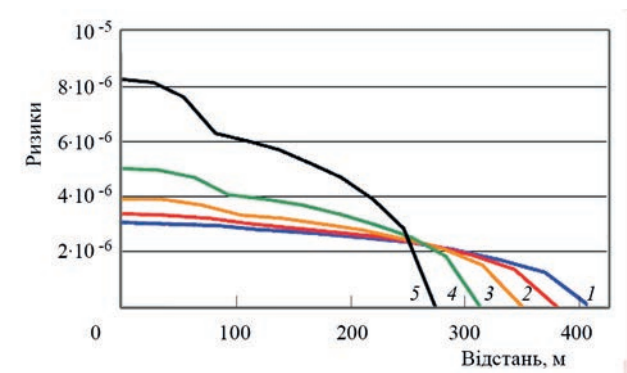


Рис. 2. Залежність ризику (за один рік) смертельного випадку в результаті аварії від відстані до трубопроводу (діаметр 914 мм, тиск 7 МПа) за різної концентрації водню у транспортіваній ГВС: 1 – чистий природний газ; 2 – 25 % водню; 3 – 50 % водню; 4 – 75 % водню; 5 – чистий водень [21]

через залізничні колії та автомобільні шляхи як місць підвищеної небезпеки. Стандарт [22] регламентує для цього випадку підвищення на одну категорію та перевірку фактичної відповідності цих ділянок підвищеній категорії.

Порядок оцінки технічного стану магістральних газопроводів з урахуванням підвищеної концентрації водню в транспортованій суміші. Періодична технічна діагностика стану МГ включає в себе заходи неруйнівного контролю, зокрема дефектоскопії, та наступного за ними експертного аналізу відповідності несучої здатності конкретних ділянок проектним умовам. Основний обсяг інформації про стан багатокілометрових ділянок лінійних частин трубопроводів отримується за результатами внутрішньотрубної діагностики (ВТД), яка полягає в пропусканні серії інтелектуальних поршнів разом із транспортованим продуктом [24, 25]. На сьогодні існує широкий спектр інструментальних засобів ВТД, які дозволяють з достатньою точністю виявляти, вимірювати, кількісно оцінювати дефектність різного типу. Проте окрім підвищеної небезпеки експлуатації дефектоскопів у водневому середовищі їх використання пов'язано з тим же комплексом проблем негативного впливу водню на властивості металевих компонентів, що характерний і для металу трубопроводу. Тому в конструкціях дефектоскопів для ГВС із вмістом водню більше 10 % мають бути використані матеріали з найбільшою стійкістю до водневої деградації. Також відомо про негативний вплив водню на довготривалу цілісність постійних магнітів з рідкоземельних металів [25, 26], що необхідно враховувати при використанні відповідних елементів, зокрема при магнітній дефектоскопії (MFL).

У разі виявлення дефектів несучильності необхідним є прийняття рішення щодо їх припустимості та планування заходів по відновленню несучої здатності трубопроводу. Припустимість дефектів (двовимірних – тріщин, тривимірних – корозійних пошкоджень, дефектів форми тощо) магістральних трубопроводів в Україні регламентується нормативним документом [27], який містить комплекс вимог і алгоритмів проведення розрахунків на статичну міцність ділянок трубопроводів із дефектністю певного типу. Межі застосування [27] дозволяють його використання для оцінки стану газопроводів при транспортуванні ними ГВС, але це вимагає певних формальних уточнень.

Так, в якості критерію граничного стану при розрахунках на статичну міцність використовуються порівняння розрахункового та проектного значень запасу міцності конкретної ділянки трубопроводу. При цьому згідно з проектними вимогами [22] коефіцієнт запасу міцності трубопроводу визначається, в тому числі, відповідно до ка-

тегорії конкретної ділянки трубопроводу, яка, як було показано вище, у разі транспортування ГВС має коригуватись. Таким чином, мінімальний припустимий запас міцності також має бути переобчислений, що може змінити висновки щодо несучої здатності дефектної ділянки трубопроводу.

Експертний висновок щодо припустимості конкретного виявленого дефекта МГ полягає, зокрема, в визначенні категорії цього дефекта, а саме: незначний, помірний, значний, критичний. Відповідно до визначеної категорії рекомендовано проводити ремонтно-відновлювальні роботи, знижувати тиск транспортованого продукту або обмежити термін експлуатації з додатковим моніторингом стану дефектної ділянки через 6 або 2 місяці та один раз або двічі на рік. Періодичність додаткового контролю в разі транспортування ГВС може бути змінена з причини недостатньої інформації про інтенсивність розвитку дефекта. Необхідним є підтвердження, що за вказаний період природне збільшення дефекта не призведе до зміни його категорії.

Окремою задачею аналізу фактичного стану МГ за результатами дефектоскопії є визначення його довговічності. Для цього необхідно враховувати наступні пошкоджуючі фактори: деградація механічних властивостей матеріалу; корозійне пошкодження; стрес-корозія; циклічне навантаження.

Деградація властивостей матеріалу з точки зору опірності різним видам руйнування в умовах підвищеної концентрації водню в транспортованому продукті, з одного боку, вимагає більш консервативного експертного аналізу припустимості дефектів, з іншого, потребує визначення часових інтервалів додаткового обстеження чи усунення виявлених дефектів. Як зазначалося вище, найбільший вплив водню спостерігається на параметри міцності (границі текучості σ_T та міцності σ_B), тріщиностійкості (в'язкість руйнування K_{Ic} , K_{Jc}) та на втомну міцність (порогове значення коефіцієнта інтенсивності напружень ΔK_{th} , швидкість росту втомної тріщини da/dN). Конкретні поточні значення вказаних фізико-механічних характеристик матеріалу трубопроводу в області виявленого дефекта мають визначатися шляхом проведення відповідних лабораторних досліджень із наявними зразками металу труб, що дозволяє врахувати додатковий негативний вплив наводнення при транспортуванні ГВС. Проте на практиці проведення відповідної кількості лабораторних випробувань важко реалізувати, тому при розрахунках на статичну міцність та довговічність прийнято використовувати певні консервативні значення відповідних параметрів. Рекомендовані в [27] підходи по інтерпретації результатів вимірювання твердості матеріалу, його ударної



Рис. 3. Умовна схема впливу взаємодії різних факторів зовнішнього впливу на механізм руйнування конструкційних матеріалів

в'язкості для визначення поточної величини σ_t та σ_v (деградація може досягати 10 %), а також K_{Jc} (до 40 %) можуть бути незастосовними в разі суттєвого розвитку розсіяного пошкодження матеріалу труб у результаті його наводнення. Особливо цього слід очікувати для ділянок трубопроводів із великим напруцюванням, яких багато в українській ГТС.

Якщо порядок розрахунку впливу корозійного розвитку дефектності при транспортуванні ГВС не змінюється у порівнянні з умовами прокачування природного газу, то надлишковий вміст водню в металі трубопроводу може значно змінити схильність металу до утворення тріщин стрес-корозії. Особливістю магістральних стрес-корозійних тріщин є їх видовженість, яка обумовлена механізмом зростання. Зародження тріщин такого типу є багатоосередковим з подальшим об'єднанням невеликих тріщин у магістральну. Це ускладнює виявлення такого роду дефектності засобами експрес-моніторингу, зокрема ВТД, тому важливим є апріорне визначення ділянок трубопроводу, найбільш схильних до стрес-корозії.

Відомо, що необхідною умовою зародження стрес-корозійних тріщин є одночасне виконання трьох умов, а саме: розтягуювальні напруження, вищі за пороговий рівень; чутлива структура металу; несприятливе корозійне середовище (рис. 3) [28]. Кожне середовище, яке обумовлює додатковий потік водню в метал і відповідне зростання мікронапружень в області наявних несутцільностей, може призвести до стрес-корозійного розтріскування. Тому для визначення можливості використання існуючої ГТС для транспортування ГВС необхідним є проведення лабораторних досліджень схильності металу труб різних ділянок до стрес-корозійного пошкодження.

Якщо певна ділянка МГ піддається впливу циклічних навантажень, то в разі зародження втомних тріщин довговічність таких ділянок визначається як параметрами тріщиностійкості, так і

швидкістю росту втомної тріщини da/dN . Як показують наявні результати досліджень [29], у присутності водню типові трубні сталі характеризуються не тільки збільшенням da/dN , але й можливою зміною характеру руйнування (рис. 4) з міжкристалітного в транскристалітний. Тому частота технічної діагностики таких ділянок трубопроводів при транспортуванні ГВС має бути збільшеною, а консервативність аналізу тріщиноподібних дефектів вищою.

Застосовність методів ремонту зварюванням елементів магістральних газопроводів із виявленою експлуатаційною дефектністю при транспортуванні ГВС. Для відновлення проектної міцності та роботоздатності елементів МГ з дефектами несутцільності, які було виявлено під час діагностики, все більшого поширення набувають методи ремонту зварюванням під тиском [30]. Це дозволяє підвищувати несучу здатність трубопроводів без необхідності зупинки транспорту продукту, зменшуючи як трудомісткість робіт, так і негативний вплив на довкілля. Проведення такого ремонту регламентується низкою стандартів, зокрема [31], які містять порядок оцінки необхідності ремонту, вибору його типу в залежності від ступеня пошкодженості конкретної ділянки трубопроводу, порядку вибору технологічних параметрів зварювання тощо. Проте в разі транспортування ГВС і суттєвого наводнення металу трубопроводу необхідно враховувати певні особливості стану МГ.

Перш за все, будь-яким ремонтним роботам на діючому МГ мають передувати обстеження можливого витoku водню, що може спричинити вибухонебезпечну ситуацію. Іншим фактором, що обмежує застосування ремонтних зварювальних технологій на діючих трубопроводах, є можливе

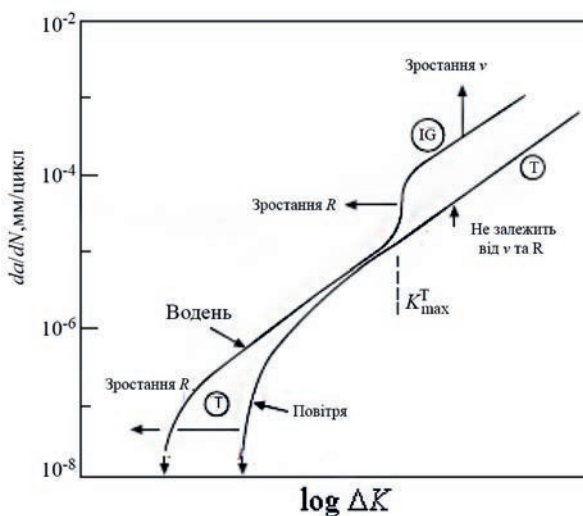


Рис. 4. Схематична діаграма впливу газоподібного водню на швидкість зростання втомних тріщин в сталях: R – коефіцієнт асиметрії циклу навантаження, v – частота навантаження, T – переважно транскристалітне руйнування, IG – переважно міжкристалітне руйнування [29]

холодне розтріскування металу в області зварювання та настання аварійної ситуації. Відомо, що для утворення холодних тріщин на певних ділянках конструкції, що зварюється, мають бути одночасно виконані три умови, а саме: наявність мартенситної структури металу, дифузійного водню та розтягувальних напружень [32]. Тому для запобігання появи холодних тріщин прийнято уникати додаткового притоку водню шляхом підготовки місця зварювання та відповідного вибору присадних матеріалів, а також застосовувати попередній підігрів області ремонту на рівні 100...150 °C в залежності від типорозміру труби, її міцності та температури оточуючого середовища [31]. Але прискорена деградація властивостей металу трубопроводу при транспортуванні ГВС збільшує схильність до холодного розтріскування, тому рекомендації щодо підготовки трубопроводу до ремонту мають бути жорсткішими. Проведення такого роду робіт за температур навколишнього середовища нижче 0 °C та інтенсивне охолодження області зварювання може створити несприятливі умови щодо схильності структури металу до холодного розтріскування. Крім того, температура попереднього підігріву має бути збільшена (до мінімально припустимого рівня 150 °C) та підтримуватися на кожному етапі багатопрохідного ремонтного зварювання чи наплавлення.

Наявність додаткових ремонтних зварних швів, які було отримано в польових умовах, знижує довговічність трубопроводу в разі інтенсивного наводнення металу з-за більш інтенсивної водневої деградації МШ та ЗТВ [33]. Тому в разі використання існуючої ГТС для транспортування водню при його концентрації в ГВС більше 20 % ремонт зварюванням під тиском слід розглядати, перш за все, як тимчасовий, з подальшою заміною відновленої трубної котушки в період планової зупинки ділянки трубопроводу. Період, на який проведені ремонтно-відновлювальні роботи гарантують належну надійність трубопроводу, має визначатись на основі результатів прогнозування довготривалої міцності в залежності від умов експлуатації, фактичного стану труби та типу ремонту.

Висновки

1. Узагальнено характерні особливості впливу водню на матеріал магістральних трубопроводів з точки зору зниження їх проектної міцності та роботоздатності. Показано, що воднева деградація властивостей сталей залежить від їх міцності, а максимальний негативний вплив спостерігається на пластичність і параметри опірності різним видам руйнування. При цьому найбільша деградація металу спостерігається в областях монта-

них зварних з'єднань, які характеризуються більш грубою мікроструктурою.

2. Розглянуто характерні проблеми в забезпеченні надійності магістральних трубопроводів при транспортуванні сумішей водню та природного газу. На основі наявних даних ризик-аналізу аварійності МГ через витік водню показано, що при його концентрації в транспортованій газоводневій суміші до 20 % відбувається відчутне підвищення ризиків через витоки в області корозійних уражень. Тому прийняття рішень щодо можливості використання існуючої ГТС для транспортування газоводневих сумішей має базуватися на відповідній оцінці фактичної дефектності та підтвердженні необхідного залишкового запасу міцності трубопроводів з корозійними ураженнями.

3. Показано необхідність перегляду категорійності окремих ділянок МГ у разі транспортування ними ГВС. Зокрема це відноситься до повітряних переходів через штучні та природні перешкоди, а також до підземних переходів через залізничні колії та автомобільні шляхи, як місць підвищеної небезпеки, для яких необхідним є підвищення на одну категорію.

4. Розглянуто особливості оцінки технічного стану трубопроводів з урахуванням підвищеної концентрації водню в транспортованій суміші. Показано необхідність уточнення періодичності неруйнівного контролю з урахуванням більш інтенсивного впливу типових пошкоджуючих факторів при транспортуванні ГВС для гарантування необхідної статичної міцності та довговічності МГ. Крім того, рекомендовані існуючими нормативними документами методи експрес-оцінки фактичних властивостей трубопроводу є обмежено застосовними в разі транспортування ГВС.

5. Проаналізовано застосовність методів ремонту зварюванням під тиском газопроводів при транспортуванні ними суміші природного газу та водню. Показано, що основною технологічною задачею при цьому є запобігання утворення холодних тріщин в наводненому металі труб, що можливо досягти вибором відповідної температури попереднього підігріву місця ремонтного зварювання та жорсткішими вимогами до припустимих температур навколишнього середовища. Крім того, наявність додаткових ремонтних зварних швів знижує загальну стійкість трубопроводів до крихкого та втомного руйнування, що необхідно враховувати при його подальшій експлуатації.

Список літератури

1. Golombek, R., Lind, A., Ringkjøb, H.-K., Seljom, P. (2022) The role of transmission and energy storage in European decarbonization towards 2050. *Energy*, **239**, Part C, 122159. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122159>
2. (2022) *Rising to the challenge of a hydrogen economy. Report*. Norway, DNV.

3. Gondal, I.A. (2016) *Hydrogen transportation by pipelines. Compendium of Hydrogen Energy*. Volume 2: Hydrogen Storage, Transportation and Infrastructure. UK, Woodhead Publishing. 301–322. DOI:https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-362-1.00012-2
4. Quarton, C.J., Samsatli, S. (2018) Power-to-gas for injection into the gas grid: What can we learn from real-life projects, economic assessments and systems modelling? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **98**, 302–316. DOI:https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.09.007
5. Melaina, M.W., Penev, M., Zuboy, J. (2015) *Hydrogen Blending in Natural Gas Pipelines*. Handbook of Clean Energy Systems. USA, John Wiley & Sons Ltd. DOI:https://doi.org/10.1002/9781118991978.hces205
6. Martin, M.L., Connolly, M., Buck, Z.N. et al. (2022) Evaluating a natural gas pipeline steel for blended hydrogen service. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, **101**, 104529. DOI:https://doi.org/10.1016/j.jngse.2022.104529
7. Ishaq, H., Dincer, I. (2020) A comprehensive study on using new hydrogen-natural gas and ammonia-natural gas blends for better performance. *Ibid*, **81**, 103362. DOI:https://doi.org/10.1016/j.jngse.2020.103362
8. Nykyforchyn, H., Unigovskiy, L., Zvirko, O. et al. (2021) Pipeline durability and integrity issues at hydrogen transport via natural gas distribution network. *Procedia Structural Integrity*, **33**, 646–651.
9. Нечаев Ю.С. (2008) Физические комплексные проблемы старения, охрупчивания и разрушения металлических материалов водородной энергетики и магистральных трубопроводов. *Успехи физических наук*, **178**, 7, 709–726. Nechaiev, Yu.S. (2008) Physical complex problems of aging, embrittlement and fracture of metallic materials of hydrogen energy and main pipelines. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, **178**(7), 709–726 [in Russian].
10. Sun, Y., Cheng, Y.F. (2022) Hydrogen-induced degradation of high-strength steel pipeline welds: A critical review. *Engineering Failure Analysis*, **133**, 105985. DOI:https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105985
11. Li, W., Cao, R., Xu, L., Qiao, L. (2021) The role of hydrogen in the corrosion and cracking of steels – a review. *Corrosion Communications*, **4**, 23–32. DOI:https://doi.org/10.1016/j.corcom.2021.10.005
12. Esaklul, K.A. (2017) *Hydrogen damage. Trends in Oil and Gas Corrosion Research and Technologies Production and Transmission*. UK, Woodhead Publishing, 315–340. DOI:https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101105-8.00013-9
13. Zhou, D., Li, T., Huang, D. et al. (2021) The experiment study to assess the impact of hydrogen blended natural gas on the tensile properties and damage mechanism of X80 pipeline steel. *International Journal of Hydrogen Energy*, **46**, 10, 7402–7414. DOI:https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.11.267
14. Dmytrakh, I., Syrotiuk, A., Leshchak, R. (2022) Specific mechanism of hydrogen influence on deformability and fracture of low-alloyed pipeline steel. *Procedia Structural Integrity*, Vol. **36**, 298–305. DOI:https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.038
15. Крижанівський Є.І., Тараєвський О.С., Петрина Д.Ю. (2005) Вплив наводнення на корозійно-механічні властивості зварних швів газопроводів. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*, **1**(14), 29–34. Kryzhanivskiy, Ye.I., Taraievskiy, O.S., Petryna, D.Yu. (2005) Influence of flooding on corrosion-mechanical properties of welds of gas pipelines. *Rozvidka ta Rozrobka Naftovykh i Gazovykh Rodovyshch*, **1**(14), 29–34 [in Ukrainian].
16. Никифорчин Г., Лунарьська Е., Цирульник О. та ін. (2009) Вплив експлуатаційної розсіяної пошкодженості на закономірності деградації властивостей конструкційних сталей. *Вісник ТДТУ*, **14**, 4, 38–45. Nykyforchyn, H., Lunarska, E., Tsyurulnyk, O.T., Nikiforov, K., Petryna, D., Sydor, P. (2009) Influence of service dispersed damage on regularities of degradation of structural steel properties. *Visnyk TDTU*, **14**(4), 38–45 [in Ukrainian].
17. Nykyforchyn, H., Lunarska, E., Tsyurulnyk, O.T. et al. (2010) Environmentally assisted «in-bulk» steel degradation of long term service gas trunkline. *Engineering Failure Analysis*, **17**, 3, 624–632. DOI:https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2009.04.007
18. Крижанівський Є.І., Никифорчин Г.М. (2011) Особливості корозійно-водневої деградації сталей нафтогазопроводів і резервуарів зберігання нафти. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, **2**, 11–20. Kryzhanivskiy, Ye.I., Nykyforchyn, H. (2011) Peculiarities of corrosion-hydrogen degradation of steels of oil and gas pipelines and oil storage tanks. *Fizyko-Khimichna Mekhanika Materialiv*, **2**, 11–20 [in Ukrainian].
19. Дорошенко Я.В. (2020) Моделювання витікань газу з газопроводів при аварійних ситуаціях. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, **3**, 22–28. DOI:https://doi.org/10.31649/1997-9266-2020-150-3-22-28 Doroshenko, Ya.V. (2020) Modeling of gas leakage from gas pipelines in emergency situation. *Visnyk VPI*, **3**, 22–28 [in Ukrainian]. DOI:https://doi.org/10.31649/1997-9266-2020-150-3-22-28
20. Li, X., Wang, J., Abbassi, R., Chen, G. (2022) A risk assessment framework considering uncertainty for corrosion-induced natural gas pipeline accidents. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **75**, 104718. DOI:https://doi.org/10.1016/j.jlp.2021.104718
21. Melaina, M.W., Antonia, O., Penev, M. (2013) *Blending Hydrogen into Natural Gas Pipeline Networks: A Review of Key Issues*. Technical Report. National Renewable Energy Laboratory, Denver West Parkway Golden, Colorado.
22. (2005) СНиП 2.05.06-85. *Магистральные трубопроводы. Строительные нормы и правила*. М., ФГУП ЦПП.
23. Murakami, Y. (2019) Hydrogen embrittlement. Metal Fatigue. Effects of Small Defects and Nonmetallic Inclusions. Second Edition. USA, Academic Press, 567–607. DOI:https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813876-2.00021-2
24. Xie, M., Tian, Z. (2018) A review on pipeline integrity management utilizing in-line inspection data. *Engineering Failure Analysis*, **92**, 222–239. DOI:https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.05.010
25. Barker, T. (2020) In-line Inspection Tool Design and Assessment of Hydrogen Pipelines. *TDW – PPSA Seminar. 17–18 November 2020*, UK, Pigging Products & Services Association, 41–45.
26. Sagawa, M., Une, Y. (2022) *The status of sintered NdFeB magnets. Modern Permanent Magnets*. UK, Woodhead Publishing, 135–168. DOI:https://doi.org/10.1016/B978-0-323-88658-1.00010-8
27. (2008) ДСТУ-Н Б В.2.3-21:2008. *Настанова. Визначення залишкової міцності магистральних трубопроводів з дефектами*. Київ, Міністерство регіонального розвитку та будівництва України. (2008) DSTU-N B V.2.3-21:2008. *Directive. Determination of residual strength of main pipelines with defects*. Kyiv, Ministry of Regional Development and Construction of Ukraine [in Ukrainian].
28. Raja, V.S., Shoji, T. (2011) *Stress Corrosion Cracking. Theory and Practice*. UK, Woodhead Publishing.
29. Xu, K. (2012) Hydrogen embrittlement of carbon steels and their welds. *Gaseous Hydrogen Embrittlement of Materials in Energy Technologies*, **2**, UK, Woodhead Publishing, 526–561.

30. Миленин А.С. (2013) К вопросу планирования ремонта магистральных трубопроводов без вывода их из эксплуатации на основе результатов внутритрубной диагностики. *Автоматическая сварка*, **5**, 3–6.
Milenin, A.S. (2013) On planning of repair of pressurized main pipelines based on the results of in-pipe diagnostics. *The Paton Welding J.*, **5**, 29–38 [in Ukrainian].
31. (2011) ГБН В.3.1-00013741-12:2011 *Магістральні газопроводи. Ремонт дуговим зварюванням в умовах експлуатації*. Київ, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України.
(2011) GBN V.3.1-00013741-12:2011. *Main pipelines. Arc welding repair in service conditions*. Kyiv, PWI [in Ukrainian].
32. Махненко В.И., Миленин А.С., Олейник О.И. (2011) Современные проблемы ремонта сухопутных магистральных трубопроводов без вывода их из эксплуатации. *Сб. докладов научно-технического семинара «Обеспечение эксплуатационной надежности систем трубопроводного транспорта»*, 10–11 июня 2011, Киев, Украина, ИЭС им. Е.О. Патона, сс. 13–20.
Makhnenko, V.I., Milenin, A.S., Olejnik, O.I. (2011) Current problems of repair of overland main pipelines without taking them out of service. In: *Proc. of Sci.-Techn. Seminar on Assurance of Service Reliability of Pipeline Transportation Systems (Kyiv, Ukraine, 10-11 June 2011)*. PWI, 13–20 [in Russian].
33. Петрина Д.Ю., Козак О.Л., Петрина Ю.Д. (2013) Коррозійно-механічні властивості зварних з'єднань магістральних трубопроводів. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*, **1**(46), 37–49.
Petryna, D.Yu., Kozak, O.L., Petryna, Yu.D. (2013) Corrosion-mechanical properties of main pipeline welded joints. *Rozvidka ta Rozrobka Naftovykh i Gazovykh Rodovyshch*, **1**(46), 37–49 [in Ukrainian].

FEATURES OF ANALYSIS OF THE TECHNICAL STATE AND SUPPORT OF RELIABILITY OF THE MAIN GAS PIPELINES AT TRANSPORTATION OF GAS-HYDROGEN MIXTURES (REVIEW)

O.S. Milenin, O.A. Velikoivanenko, G.P. Rozyinka, N.I. Pivtorak

E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU, 11 Kazymyr Malevych str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: asmilenin@ukr.net

Analytical review of the features of operation, expert analysis of the technical condition, and support of the reliability of the main gas pipelines at transportation of natural gas and hydrogen mixtures through them was performed. Proceeding from modern concepts of hydrogen degradation of pipe steels, conditions are considered which are required for safe use of the currently available gas transportation system for this purpose, in particular, with different hydrogen concentration in the mixture. Additional requirements were formulated as to evaluation of the acceptability of typical defects, and procedure of their repair by pressure welding methods. 33 Ref., 2 Tabl., 4 Fig.

Keywords: gas-hydrogen mixture, main gas pipeline, hydrogen degradation, technical state, technical state, reliability, repair

Надійшла до редакції 07.04.2022

XXI МІЖНАРОДНИЙ ПРОМИСЛОВИЙ ФОРУМ – 2022 МІЖНАРОДНІ СПЕЦІАЛІЗОВАНІ ВИСТАВКИ

15 - 18 листопада



Генеральний
інформаційний партнер:



Ексклюзивний
медіа партнер:

ЖУРНАЛ
ГОЛОВНОГО
ІНЖЕНЕРА



**МІЖНАРОДНИЙ
ВИСТАВКОВИЙ ЦЕНТР**

м. Київ, Броварський пр-т, 15
станція метро «Лівобережна»

+38 (044) 201-11-65, (56)

plast@iec-expo.com.ua

www.iec-expo.com.ua



АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ТЕПЛООВОГО НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ШЛЯХОМ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ КОМПЛЕКСУВАННЯ ТЕРМОГРАМ

Д.В. Сторожик, А.Г. Протасов, О.В. Муравйов, В.Ф. Петрик, Д.В. Петренко

НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37.

E-mail: a.g.protasov@gmail.com

Проведено експериментальні дослідження з метою підвищення якості термограм, отриманих при тепловому неруйнівному контролі. Застосовано метод комплексування зображень на основі вейвлет-перетворення з використанням нейронних мереж. Для визначення форми дефекту використовувалась нейронна мережа, архітектура якої мала шари, що реалізують операцію згортки. Попереднє навчання нейронної мережі було реалізовано на основі великої кількості теплових зображень тест-об'єктів, що імітують різні дефекти. Застосування комплексованих термограм в якості вхідних даних для нейронної мережі дозволило суттєво зменшити похибку визначення класу дефекту на зображенні. Розроблено комп'ютерну програму обробки термограм, що дозволяє автоматизувати процес теплового контролю та підвищити ймовірність правильного визначення наявності та форми дефекту в досліджуваному об'єкті. Бібліогр. 9, рис. 5.

Ключові слова: тепловий неруйнівний контроль, комплексування зображень, нейронні мережі

Вступ. Теплові методи НК сьогодні знайшли широке застосування у різних галузях промисловості: від контролю теплоізоляції звичайних приміщень до визначення дефектних структур в авіаційних конструкціях [1]. Це, в першу чергу, обумовлено простотою технологічного процесу такого контролю та швидкістю його протікання. Разом з тим існує ряд факторів, які впливають на ефективність результатів контролю та суттєво знижують ймовірність визначення дефекту. Наявність неоднорідності коефіцієнта випромінювання на поверхні об'єкта контролю та розтікання теплової енергії вздовж цієї поверхні призводять до появи шумів у тепловізійній апаратурі, що є причиною спотворення теплового зображення об'єкту. Отже, на сьогодні задача покращення теплових зображень стає дійсно актуальною. Один з методів, що використовуються для покращення зображень у видимій частині оптичного спектру, – це комплексування даних [2, 3]. Головною метою застосування цього алгоритму є отримання більш інформативного, менш зашумленого, тобто якісного зображення з множини вхідних зображень. Результати досліджень, наведених у сучасній науковій літературі, показують, що комплексоване зображення дає змогу отримати більше інформації, ніж загалом з кожного окремого вхідного зображення [4–6].

У даній статті запропоновано результати дослідження застосування методу комплексування теплових зображень на основі вейвлет-перетворення з використанням нейронних мереж для автоматичного виявлення дефектів при тепловому

неруйнівному контролі. Вейвлет-перетворення знаходить на сьогоднішній день безліч застосувань для обробки зображень, серед яких: стиснення, аналіз зображень, розпізнавання образів. Головна відмінність вейвлет-перетворення від перетворення Фур'є полягає у тому, що перше дає можливість аналізувати локальні частки сигналу, а не його загальні властивості.

Нейронні мережі останнім часом все частіше почали використовувати для обробки зображень. Доведено їх високу ефективність у порівнянні з класичними методами комп'ютерного зору. Первинними критеріями ефективності нейронних мереж є: ймовірність правильних відповідей на поставлену задачу та швидкість процесу обробки. На ці показники насамперед впливають якість даних та архітектура моделі. Використання нейронних мереж з машинним навчанням дозволяє автоматизувати процедуру обробки теплових зображень та процес контролю в цілому. У даній роботі головний акцент було зроблено саме на підвищення якості даних.

Опис експериментальної частини. Для отримання теплових зображень від дефекту були використані зразки з гетинаксу зі штучними дефектами. Розміри зразка: 100×100 мм, товщина – 8 мм. Дефекти мали форму трикутника, кола та прямокутника, глибина залягання яких від поверхні дорівнювала 2 мм. У процесі експерименту верхня поверхня зразка нагрівалася інфрачервоною лампою до 298...303 °K (25...30 °C). При нагріванні проводилось вимірювання температури та фіксація теплового поля протилежної поверхні зразка

Сторожик Д.В. – <https://orcid.org/0000-0003-0320-268X>, Протасов А.Г. – <https://orcid.org/0000-0002-2965-3334>, Муравйов О.В. – <https://orcid.org/0000-0002-7699-0245>, Петрик В.Ф. – <https://orcid.org/0000-0003-2301-0722>

© Д.В. Сторожик, А.Г. Протасов, О.В. Муравйов, В.Ф. Петрик, Д.В. Петренко, 2022

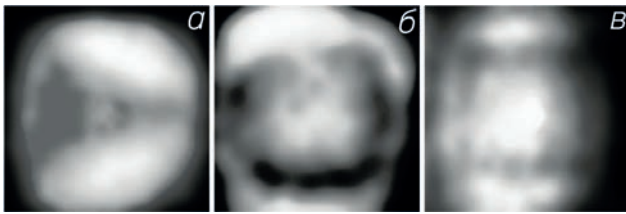


Рис. 1. Теплові зображення поверхні зразків з дефектами у формі: *а* – трикутника, *б* – кола, *в* – прямокутника

тепловізором, який має матричний приймач випромінювання 60×60 елементів. На рис. 1 показано теплові зображення поверхні зразків, що мали внутрішні дефекти у формі трикутника, кола та прямокутника.

Як видно з рис. 1, отримані зображення мають погану якість: теплове поле не однорідне, форми дефектів не чіткі та розпливчасті. Тому з отриманих знімків важко визначити форму дефекту.

Вирішення поставленої задачі. Для вирішення поставленої задачі було використано згорткову нейронну мережу, архітектура якої має шари, що виконують операцію згортки. Для навчання даної нейронної мережі було застосовано кілька сотень зображень, приклади яких показані на рис. 1. Нейронна мережа вирішувала завдання визначення форми дефекту (коло, квадрат, трикутник). На вхід розробленої програми подавалося зображення з відомою формою дефекту, а на виході мережа визначала ймовірність (число від 0 до 1) приналежності зображення до кожної з представлених категорій, після розраховувалась помилка, на основі якої коригувалися вагові коефіцієнти класифікатору нейронної мережі. Такий підхід часто використовують для обробки зображень.

На наступному етапі реалізації поставленої задачі було проведено експеримент з використанням комплексованих зображень в якості вхідних даних для нейронної мережі. Комплексування зображень – це процес об'єднання декількох знімків для отримання одного, більш якісного та інформативного зображення. Отже, використання комплексованих даних на вході нейронної мережі дозволяє отримати на виході меншу похибку визначення класу зображення.

Перед початком процедури навчання нейронної мережі було проведено попередню обробку отриманих з тепловізора термограм, яка полягала в усуненні всіх неінформативних для вирішення поставленої задачі елементів зображення, оскільки зайва інформація збільшує похибку класифікації та робить мережу надто чутливою до другорядних даних. Для здійснення обробки теплових зображень було розроблено програму, яка автоматично проводить попередню корекцію та дає спрощені зображення. Алгоритм реалізації запропонованої програми показано на рис. 2. Послідовність виконання алгоритму наступна:



Рис. 2. Алгоритм попередньої обробки теплового зображення у вигляді прямокутника

1. обрізка незначних областей зображень, тобто технічних написів та індикаторів, створених тепловізором;

2. застосування фільтру Гауса для зменшення шумів та артефактів, створених алгоритмом збільшення зображень у програмному забезпеченні тепловізора;

3. вирівнювання гістограми, розподілу пікселів різної яскравості для збільшення контрасту;

4. зменшення роздільної здатності зображення.

Застосування попередньої обробки зображень за наведеним алгоритмом дозволило використати спрощений тип нейронної мережі. На наступному етапі програмним шляхом кількість зображень було збільшено в декілька разів. Для цього були використані операції зменшення, збільшення та повороту зображень. Таким чином, навчальну вибірку для нейронної мережі було штучно збільшено, що в результаті значно зменшило похибку визначення класу дефекту на термограмі.

Методом реалізації комплексування зображень було обрано комплексування на основі вейвлет-перетворення. Авторами робіт [7, 8] було доведено, що цей метод є найбільш ефективним з точки зору таких показників вимірювання кількості інформації, як ентропія Шенона, перехресна ентропія та взаємна інформація.

У основі вейвлет-перетворення лежить вейвлет-функція $\psi(t)$, середнє значення якої дорівнює нулю і яка локалізована в часі та просторі [9]:

$$W(a, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi_{a,\tau}(t) dt,$$

де: $\psi_{a,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-\tau}{a}\right)$; a – параметр масштабу;

τ – параметр зсуву; $\psi(t)$ – основний вейвлет.

Двовимірне вейвлет-перетворення дозволяє отримати 4 масиви коефіцієнтів: один низькочастотний та три високочастотних. Графічне подання отриманих масивів цих коефіцієнтів показано на рис. 3.

На рис. 3 наведено вейвлет-перетворення теплового зображення поверхні зразка з внутрішнім дефектом у вигляді трикутника.

Розроблений алгоритм комплексування на основі вейвлету-перетворення показаний на

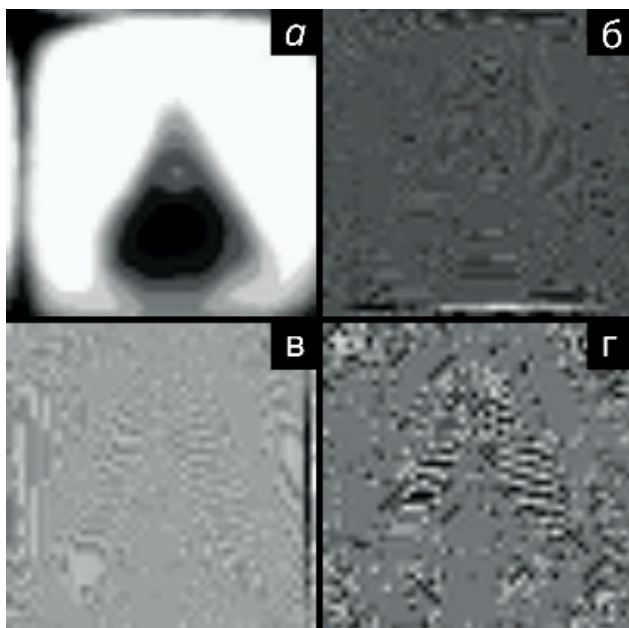


Рис. 3. Графічне подання масивів коефіцієнтів вейвлет-перетворення теплового зображення: *а* – низькочастотні; *б–г* – високочастотні

рис. 4, де продемонстровано комплексуювання двох теплових зображень дефекту у формі трикутника. Аналогічний алгоритм було використано і для множини зображень. До вхідних зображень було застосовано вейвлет-перетворення та отримано зображення у вигляді вище згаданих коефіцієнтів. Для отримання результуючого зображення у вигляді коефіцієнтів було використано один з алгоритмів попиксельного комплексуювання та проведено усереднення для пар коефіцієнтів одного типу. Проведені дослідження підтвердили, що такий підхід забезпечує найкращий результат.

На останньому етапі формування комплексованого зображення було застосовано зворотне вейвлет-перетворення. Узагальнену схему алгоритму комплексуювання теплового зображення на основі вейвлет-перетворення показано на рис. 4.

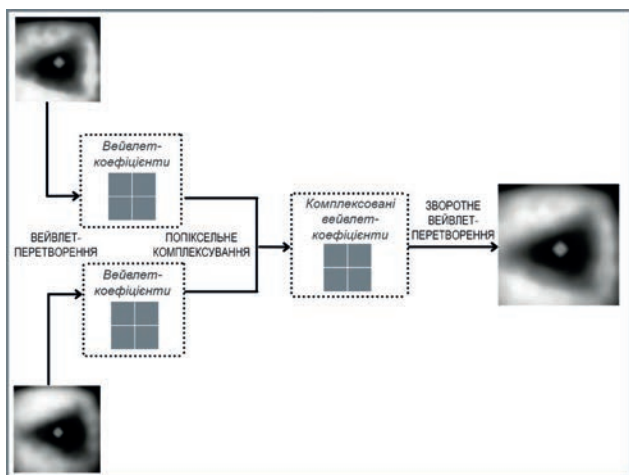


Рис. 4. Узагальнена схема алгоритму комплексуювання теплового зображення на основі вейвлет-перетворення

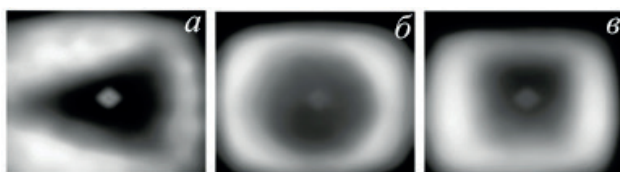


Рис. 5. Результат комплексуювання теплових зображень поверхні зразків з дефектами у формі: *а* – трикутника, *б* – кола, *в* – прямокутника

З метою експерименту також було проведено комплексуювання односценних термограм, які мали незначні розбіжності, спричинені тремтінням камери в руках оператора.

Результати вирішення задачі. У результаті реалізації запропонованого алгоритму комплексуювання теплових зображень було отримано термограми поверхні зразків з дефектами різної форми. На рис. 5 показано кінцевий результат комплексуювання зображення. Комплексовані зображення відрізняються від початкових та дають змогу розрізнити форму дефекту.

Для перевірки ефективності запропонованої методики було визначено частку правильно класифікованих зображень за формою дефекту (у відсотках), тобто відношення кількості спроб, у яких правильно класифіковано дефект, до загальної кількості спроб. Імовірність правильно класифікованих первинних зображень, тобто до комплексуювання, склала 52 %. Аналогічну процедуру було застосовано до тих самих зображень після їх комплексуювання та отримано результат у 65 %. Порівняння початкових зображень з отриманими в результаті застосування запропонованої методики комплексуювання демонструє, що точність визначення форми дефекту підвищилась на 13 %. Можна припустити, що такий ефект спостерігається через агрегацію інформації за допомогою комплексуювання, тим самим посилюючи «ознаку типу форми» для нейронної мережі.

Висновки

Розроблений алгоритм автоматизованої цифрової обробки термограм, що базується на методі комплексуювання даних, дав змогу підвищити якість теплового зображення при проведенні процедури теплового неруйнівного контролю. Експериментальну перевірку запропонованої методики було реалізовано з використанням термограм, отриманих з тепловізора, що має низьку роздільну здатність (матричний приймач випромінювання 60×60 елементів).

Для вирішення задачі визначення форми дефекту було використано згорткову нейронну мережу з попереднім навчанням. Використання методу комплексуювання даних на основі вейвлет-перетворення дозволило підвищити ймовірність правильної класифікації дефекту на термо-

грамі нейронною мережею на 13 % у порівнянні з початковими некомплексованими зображеннями. Розроблена комп'ютерна програма обробки термограм дозволяє автоматизувати процес теплового контролю та визначати наявність дефекту та його форму з більш високою ймовірністю.

Список літератури

1. Protasov, A. (2018) Active infrared testing of composites using 3D computer simulation. *International Journal of Technology*, 9(3), 632–641. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v9i3.218>
2. Галаган Р., Муравьев А., Томашук А. (2019) Модель восстановления серии изображений из смазанного изображения для решения задачи высокоточного измерения диаметра и температуры излучающих объектов. *Материали IV Міжнародної науково-технічної конференції «Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки, приладобудування і комп'ютерних технологій» (присвячена 80-річчю з дня народження професора Я.І. Проця)*, 169–171.
3. Qu, Z., Jiang, P., Zhang, W. (2020) Development and application of infrared thermography non-destructive testing techniques. *Sensors*, 20(14), 3851.
4. Сторожик Д.В., Муравйов О.В., Протасов А.Г. та ін. (2020) Комплексування мультиспектральних зображень як метод підвищення їх інформативності при бінарній сегментації. *Наукові вісті КІП*, 2, 82–87.
5. Thirunavukkarasu, S., Rao, B.P.C., Soni, A.K. et al. (2012) Comparative Performance of Image Fusion Methodologies in Eddy Current Testing. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 4(24), 5548–5551.
6. Zhijun, Wang, Ziou, D., Armenakis, C. et al. (2005) A comparative analysis of image fusion methods. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(6), 1391–1402.
7. Hamza, A.B., He, Y., Krim, H. et al. (2005) Multiscale approach to pixel-level image fusion. *Integr. Comput. Aid. Eng.*, 12(2), 135–146.
8. Sabuncu Mert Rory. (2006) *Entropy Based Image Registration*. Ph.D. dissertation, Department of Electrical Engineering, Princeton University.
9. Shensa, M.J. (1992) The discrete wavelet transform: wedding the a trous and Mallat algorithms. *IEEE Transactions on signal processing*, 40(10), 2464–2482.

References

1. Protasov, A. (2018) Active infrared testing of composite using 3D computer simulation. *Int. J. of Technology*, 9(3), 632–641. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v9i3.218>.
2. Galagan, R., Muraviov, A., Tomashuk, A. (2019) A model for recovering a series of images from a smeared image in solution of problem of high precision measurement of diameter and temperature of radiation objects. In: *Proc. of 4th Int. Sci.-Tech. Conf. on Theoretical and Applied Aspects of Radio Engineering, Equipment and Computer Technologies (to 80th Anniversary of Prof. Ya.I. Prots)*, 169–171.
3. Qu, Z., Jiang, P., Zhang, W. (2020) Development and application of infrared thermography non-destructive testing techniques. *Sensors*, 20(14), 3851.
4. Storozhyk, D.V., Muraviov, O.V., Protasov, A.G. et al. (2020) Complexing of multispectral images as a method of increase of their informative in binary segmentation. *Naukovi Visti KPI*, 2, 82–87 [in Russian].
5. Thirunavukkarasu, S., Rao, B.P.C., Soni, A.K. et al. (2012) Comparative performance of image fusion methodologies in eddy current testing. *Research J. of Applied Sci., Engineer. and Technol.*, 4(24), 5548–5551.
6. Zhijun, Wang, Ziou, D., Armenakis, C. et al. (2005) A comparative analysis of image fusion methods. *IEEE Transact. on Geoscience and Remote Sensing*, 43(6), 1391–1402.
7. Hamza, A.B., He, Y., Krim, H. et al. (2005) Multiscale approach to pixel-level image fusion. *Integr. Comput. Aid. Eng.*, 12(2), 135–146.
8. Sabuncu Mert Rory. (2006) *Entropy based image registration*. In: Ph.D. dissertation, Department of Electrical Engineering, Princeton University.
9. Shensa, M.J. (1992) The discrete wavelet transform: wedding the a Trous and Mallat algorithms. *IEEE Transact. on Signal Processing*, 40(10), 2464–2482.

AUTOMATION OF THERMAL NON-DESTRUCTIVE TESTING PROCESS BY APPLYING THE METHOD OF COMPLEXING THERMOGRAPHS

D.V. Storozhik, A.G. Protasov, O.V. Muraviov, V.F. Petrik, D.V. Petrenko

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». 37 Peremohy Ave., 03056, Kyiv, Ukraine.
E-mail: a.g.protasov@gmail.com

Experimental studies were conducted to improve the quality of thermograms obtained by thermal non-destructive testing. The method of image complexation based on wavelet transform using neural networks is applied. To determine the shape of the defect, a neural network was used, the architecture of which had layers that implement the convolution operation. Preliminary training of the neural network was implemented on the basis of a large number of thermal images of test objects that imitate various defects. The use of complex thermograms as input data for the neural network has significantly reduced the error in determining the class of the defect in the image. The developed computer program for thermogram processing allows automating the process of thermal testing and increasing the probability of correctly determining the presence and form of the defect in the tested object. Ref. 9, Fig. 5.

Keywords: thermal non-destructive testing, image complexation, neural networks

Надійшла до редакції 18.02.2022

Materials, methods and technologies

24th International Conference

19-22 August, 2022

Burgas, Bulgaria

<http://bit.ly/2Aa6Jk3>



SCIENCE &
EDUCATION
FOUNDATION



АНАЛІЗ РОБОТИ ДВОКОНТУРНОГО АВТОГЕНЕРАТОРНОГО ВИХРОСТРУМОВОГО ДЕФЕКТОСКОПА В РЕЖИМІ ПЕРЕРИВЧАСТОЇ ГЕНЕРАЦІЇ

В.М. Учанін

Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України. 79060, м. Львів, вул. Наукова 5. E-mail: vuchanin@gmail.com

Своєчасне застосування засобів неруйнівного контролю відповідальних конструкцій сучасної техніки є важливим фактором забезпечення їх безпечної та безаварійної експлуатації. Засоби вихрострумowego контролю не мають альтернативи для безконтактного виявлення тріщин в авіаційних конструкціях. Для виявлення поверхневих тріщин (у тому числі через шар діелектричного покриття) використовують автогенераторні вихрострумові дефектоскопи, які працюють на робочих частотах понад 1 МГц. Для створення таких дефектоскопів перспективним є використання двоконтурної коливальної системи, яка працює у режимі переривчастої генерації. У роботі досліджено нові технічні рішення, зокрема схему автогенератора на польовому транзисторі з ізолюваним затвором, схему керування частотою генерації та схему регенерації коливань автогенератора. Показано їх переваги щодо чутливості порівняно із традиційними схемами. Проаналізовані технічні рішення використано для створення автогенераторних вихрострумowych дефектоскопів для виявлення поверхневих тріщин типу ВД 3.03Н, ВД 3.02Н, ВД 4.01Н і ВД 4.03Н, які пройшли державні випробування і широко використовуються, зокрема, для технічного обслуговування літаків ДП «Антонов» та авіаційних двигунів ДП «Івченко-Прогрес» і ПАТ «Мотор-Січ». Передбачається використання даних технічних рішень у новому автогенераторному дефектоскопі з функціями автоматичного налаштування на заданий методикою контролю рівень чутливості та її індикації. Бібліогр. 15, табл. 2, рис. 13.

Ключові слова: вихрострумовой неруйнівний контроль, автогенераторний вихрострумовой дефектоскоп, поверхневі тріщини, переривчаста генерація, двоконтурний коливальний контур, регенерація коливань

Вступ. Надійність і безпека відповідальних конструкцій та вузлів сучасної техніки у значній мірі залежить від своєчасного застосування засобів неруйнівного контролю (НК) у процесі їх виробництва та експлуатації, що особливо важливо в умовах збільшення термінів експлуатації і робочих навантажень, впливу агресивних середовищ тощо. Засоби вихрострумowego НК із використанням робочих частот понад 1 МГц традиційно використовують для безконтактного виявлення неглибоких тріщин металевих конструкцій [1, 2]. У той же час вихрострумовой метод має суттєву чутливість до низки факторів (окрім дефектів), які впливають на вихідний сигнал ВСП. Серед таких факторів зазначимо зміни питомої електропровідності (ПЕП) і магнітної проникності матеріалу ОК, вплив краю об'єкта контролю (ОК), варіації геометричних параметрів та зазору між вихрострумowym перетворювачем (ВСП) і поверхнею ОК. Зміни зазору і нахилу ВСП під час ручного контролю вважаються найшкідливішим джерелом помилкових спрацювань апаратури контролю. Зміни зазору, викликані різною шорсткістю поверхні ОК або варіаціями товщини діелектричного покриття, також можуть призвести до помилкових спрацювань вихрострумowego дефектоскопа (ВД). Тому для отримання достовірних результатів контролю важливо забезпечити високий рівень

заглушення ефекту зазору і просту інтерпретацію результатів контролю.

Для вихрострумовой дефектоскопії конструкцій і виробів у різних галузях промисловості широко використовують автогенераторні ВД [1–8]. Загальною особливістю таких ВД є включення параметричного ВСП в якості елемента коливального контуру автогенератора (АГ), який являє собою нелінійний резонансний підсилювач, охоплений колом додатного зворотного зв'язку [9]. Дефектоскопи цього типу з'явилися ще у середині 50-х років минулого сторіччя, що було пов'язано з освоєнням виробництва важких літаків і потужних авіаційних двигунів [1]. Наприкінці 80-х років минулого сторіччя серійно випускались автогенераторні ВД типу ПРОБА-5 і ТВД-А, які дотепер успішно працюють на деяких підприємствах [1, 3, 4]. Автогенераторні ВД характеризуються високою чутливістю до поверхневих дефектів, можливістю відлаштування від впливу змін зазору, автономним живленням, невеликими габаритами і вагою. Запропоновано багато варіантів побудови автогенераторних ВД, кожен з яких має свої недоліки і переваги. Порівняльний аналіз різних варіантів побудови та класифікацію автогенераторних ВД наведено у роботі [10].

Коливальна система автогенераторного ВД може складатися з одного або двох резонансних контурів. Одноконтурні АГ будувалися за схе-

мою із загальною базою і ємнісним зворотним зв'язком. Двоконтурні автогенераторні ВД мають кращі метрологічні характеристики за рахунок гнучкішого переналаштування у різні режими. Важливою відмінністю двоконтурних ВД є залежність коефіцієнта зворотного зв'язку від частоти, що можна використати для заглушення впливу зміни зазору між ВСП і поверхнею ОК [1, 8, 10, 11]. Важливою ознакою автогенераторних ВД є також вид коливань, що генеруються автогенератором. У деяких моделях ВД, наприклад ВД-22Н (ПРОБА-5), використовують незагасаючі безперервні коливання [3]. Перспективнішим виглядає використання переривчастих коливань, які формуються за умови, коли постійна часу кола автоматичного зміщення $\tau_3 = R_3 \cdot C_p$ (R_3 і C_p – опір резистора та ємність розділювальної ємності у колі затвору) буде більша за постійну часу робочого коливального контуру $\tau_k = 2L/R$ (L і R – індуктивність і активний опір обмотки ВСП), тобто за умові $\tau_3 \gg \tau_k$ [1, 4, 8, 10]. Додатковою перевагою таких ВД є можливість побудувати звукову змінно-тональну індикацію без застосування керованих напругою низькочастотних генераторів. Більш того, ВД з переривчастими коливаннями за рахунок змінно-тональної індикації дозволяють контролювати перевищення зазору на слух [4]. Частота проходження серій високочастотних коливань при зміні внесеного опору ВСП змінюється, так як параметри ВСП впливають на постійну часу робочого контуру. Вибором величини постійної часу кола автоматичного зміщення можна встановити частоту проходження серії високочастотних коливань у звуковому діапазоні. Додатковою перевагою ВД із переривчастими коливаннями є економічність, так як активний елемент не споживає енергію під час перерваної генерації, що важливо для ВД з автономним живленням. Спосіб отримання переривчастих коливань визначається вибором значень RC -елементів автоматичного зміщення у затворному (базовому) колі транзистора [1]. Наведений короткий огляд висвітлив ефективність побудови автогенераторних ВД на основі використання двоконтурних коливальних схем у режимі переривчастої генерації [8, 10, 11].

Метою цієї роботи є аналіз технічних рішень, напрацьованих під час розробки вітчизняних автогенераторних ВД типу ВД 3.03Н, ВД 3.02Н, ВД 4.01Н і ВД 4.03Н (Леотест ВД). Йдеться про вдосконалену схему АГ, схему керування частотою автогенератора (СКЧА) і схему регенерації коливань автогенератора (СРКА).

1. Розробка та дослідження вдосконаленої схеми автогенератора ВД. У багатьох відомих автогенераторних ВД у якості активного елементу найчастіше використовують біполярні транзистори

або польові транзистори із закритим p - n -переходом. Проведений аналіз показав, що ефективну схему автогенераторного ВД можна створити на основі польових транзисторів з ізольованим затвором, у яких коло зворотного зв'язку практично не навантажується вхідним опором активного елемента (Учанін В.М., Черленевський В.В. Вихрострумовий дефектоскоп. України пат. 39207, 2009, Бюл. № 3). Запропонована схема (рис. 1) складається з двоконтурного АГ 1, який має робочий контур 2 із включеним у нього ВСП параметричного типу 3 і опорний контур 7. Автогенератор 1 виконано на польовому транзисторі з ізольованим затвором 9, у коло автоматичного зміщення якого паралельно резистору 8 додатково включено діод 6. Між виходом АГ 1 і блоком живлення 12 включено СРКА 10. До виходу АГ 1 підключено блок звукової індикації 11. У робочий контур АГ може бути включений варикап 4, керований вхід якого підключений до блоку живлення 10 через блок керованої постійної напруги, виконаний у вигляді потенціометра 5.

Дослідження сигналів запропонованої схеми на відповідність режиму переривчастої генерації проводили за допомогою цифрового осцилографа TDS 1012 із модулем зв'язку з комп'ютером типу TDS 2CMA [12]. Сигнали реєстрували у стоку польового транзистора VT1 (рис. 1) при підключенні у робочий контур параметричного ВСП [11]. Використовували СЗ типу СОП 5-1 з алюмінієвого сплаву зі штучним дефектом довжиною 2 мм, глибиною 0,5 мм і розкриттям 0,1 мм. На рис. 2 наведено сигнали, отримані при розміщенні ВСП на відстані від СЗ (у «повітрі») (рис. 2, а) і в бездефектній зоні СЗ (рис. 2, б), з часом розгортки 2,5 мс/под. ВД попередньо налаштували на максимальну чутливість до дефектів у досліджуваному матеріалі. Як бачимо, характер сигналу при розміщенні ВСП у «повітрі» і на поверхні СЗ не змінюється. При цьому при розміщенні ВСП у «повітрі» період слідування серій високочастотних коли-

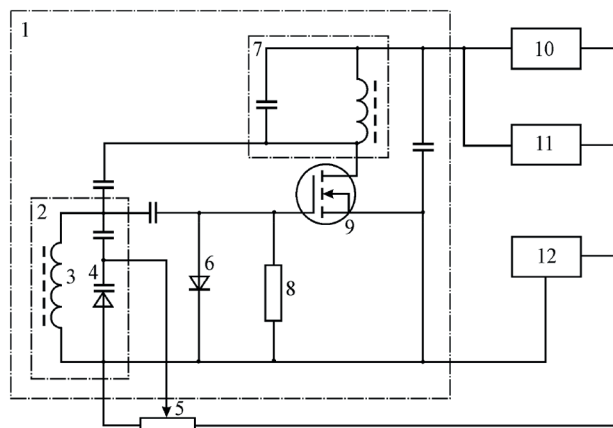


Рис. 1. Схема автогенераторного ВД на польовому транзисторі з ізольованим затвором

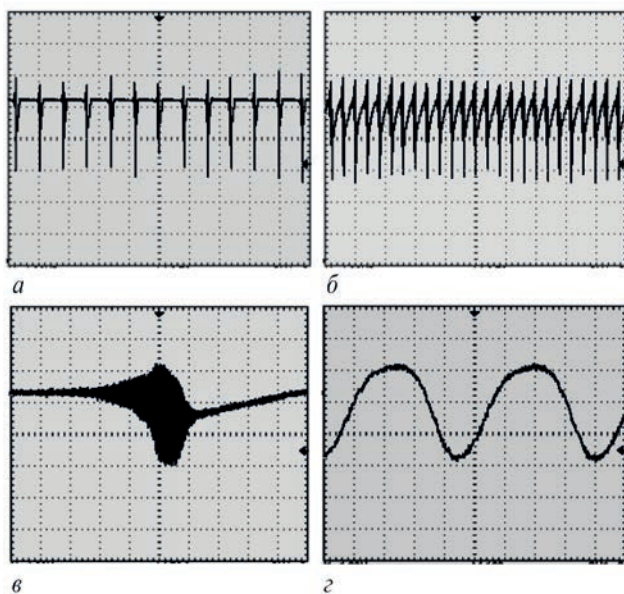


Рис. 2. Сигнали у стоку польового транзистора під час розміщення ВСП у «повітрі» (а) та у бездефектній зоні СЗ за частоти розгортки 2,5 мс/под (б), 50 мкс/под (в) і 100 нс/под (з) вань складає 2 мс (частота $F = 500$ Гц), а при розміщенні ВСП на СЗ період слідування серій високочастотних коливань зменшується вдвічі до 1 мс (частота $F = 1$ кГц). Амплітуда сигналів при встановленні ВСП на СЗ збільшується несуттєво. Розглянемо детальніше структуру сигналів, коли час розгортки осцилографу під час розміщення ВСП у «повітрі» зменшено з 2 мс/под (рис. 2, а) до

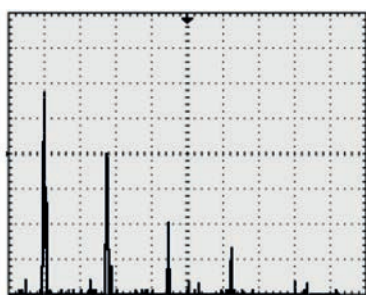


Рис. 3. Спектр сигналу у стоку польового транзистора за розміщення ВСП у «повітрі»

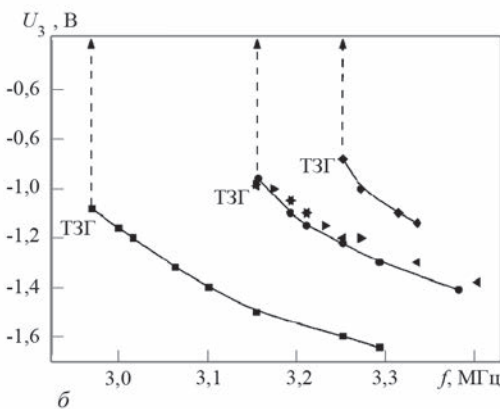
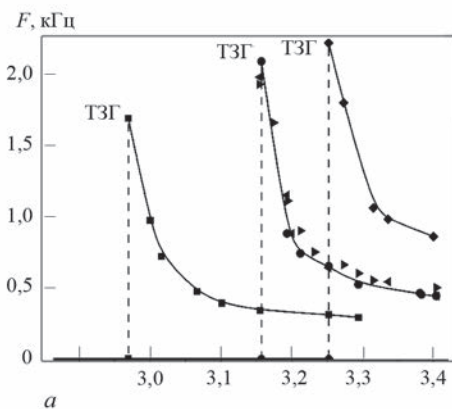


Рис. 4. Залежність частоти F слідування серій високочастотних коливань (а) і напруги зміщення U_3 (б) АГ у діапазоні контролю низькопровідних матеріалів від робочої частоти f під час розміщення ВСП у «повітрі» (■) і на СЗ з ПЕП 0,54 МСм/м (◄); 0,94 МСм/м (►); 2,05 МСм/м (●) та сталі 45 (♦)

50 мкс/под (рис. 2, в) та 100 нс/под (рис. 2, з), тобто зображення «розтягнуто» по шкалі часу у 40 і 20000 разів відповідно. Високочастотне заповнення імпульсу переривчастої генерації АГ (рис. 2, а) можна детальніше побачити за зменшення часу розгортки до 100 нс (рис. 2, з). Сигнали заповнення мають близьку до синусоїдальної форму частотою 2,2 МГц (рис. 2, з).

На рис. 3 показано спектр сигналу, наведеного вище на рис. 2, отриманий за допомогою цифрового осцилографу TDS 1012, який дозволяє реалізувати операцію швидкого перетворювання Фур'є [12]. На спектрі сигналу видно складові, що зменшуються за амплітудою, відстань між якими на частотній осі складає 2,2 МГц, що відповідає частоті високочастотного заповнення імпульсу на рис. 2, з.

Розглянемо залежності напруги зміщення U_3 і частоти слідування серій високочастотних коливань F від частоти f високочастотних коливань АГ (рис. 2). Частоту f і частоту слідування серій високочастотних коливань F вимірювали цифровим осцилографом типу TDS 1012 шляхом підключення до стоку транзистора VT1 через подільник напруги 1:10. Напругу зміщення U_3 вимірювали на затворі транзистора VT1 (рис. 1) цифровим мультиметром M890F із внутрішнім опором 20 МОм/В, який для виключення впливу паразитної ємності щупу підключали через резистор величиною 1 МОм. Частоту f змінювали шляхом регулювання ємності робочого контуру АГ. Дослідження проводили при розміщенні ВСП у «повітрі», а також після встановлення ВСП на СЗ з неферомагнітного сплаву з ПЕП від 0,54 до 51,9 МСм/м і на СЗ із феромагнітної сталі 45 для двох режимів контролю, що відповідають високопровідним (алюмінієві сплави) та низькопровідним (титанові сплави, сталі) матеріалам. Для кожного досліджуваного матеріалу і режиму налаштування АГ визначали точку зриву генерації (ТЗГ на рис. 4, 5).

Аналіз залежностей на рис. 4, 5 показує, що зрив коливань АГ для СЗ із різною ПЕП для кож-

ного режиму налаштування АГ (і групи матеріалів) має місце при однаковій робочій частоті f і напрузі зміщення U_3 . У режимах контролю низькопровідних і високопровідних матеріалів АГ генерує стабільні високочастотні коливання відповідно на робочих частотах 3,4 і 2,2 МГц, що відповідає початку діапазонів досліджуваних частот. При зменшенні частоти f (робочої частоти) і відповідному збільшенні різниці резонансних частот робочого і опорного контурів Δf умови генерації погіршуються. Це призводить спочатку до поступового збільшення частоти слідування імпульсів F і зриву генерації (ТЗГ), який показано на рис. 4, а і 5, а вертикальною пунктирною лінією. Крутизна залежностей при наближенні до точки зриву генерації збільшується, що підтверджує високу чутливість автогенератора при налаштуванні у режим, близький до цієї точки (ТЗГ на рис. 4, 5). При зниженні робочої частоти f за рахунок погіршення умов генерації і зменшення амплітуди високочастотних коливань напруга зміщення U_3 зменшується до досягнення певного значення, при якому має місце зрив генерації. Напруга зміщення U_3 за відсутності високочастотних коливань після зриву коливань різко зменшується (вертикальна пунктирна лінія на рис. 4, б і 5, б) до нуля.

Ефективність розробленої схеми АГ досліджено експериментально порівнянням чутливості автогенераторних ВД на польових транзисторах 2П303 (із закритим p - n -переходом) і 2П305 (з ізолюваним затвором). За критерій чутливості прийнято змiну частоти проходження серій високочастотних коливань у режимі переривчастої генерації при внесенні у робочий контур додаткового опору величиною 47 кОм (табл. 1). Перед цим

ВСП встановлювали на бездефектну частину СЗ із алюмінієвого сплаву (СОП 5-1), титанового сплаву (СОП 5-2) і феромагнітної сталі (СОП 5-3).

Надані результати свідчать, що чутливість запропонованої схеми ВД з АГ на транзисторі з ізолюваним затвором більша для всіх конструкційних матеріалів. Найбільше (у 1,5 рази) чутливість збільшується для високопровідних неферомагнітних матеріалів і найменше (у 1,2 рази) – для феромагнітного сплаву. Вибір польового транзистора з ізолюваним затвором у якості активного елементу АГ дозволяє підвищити надійність роботи автогенераторного ВД під час контролю матеріалів із різними електрофізичними властивостями і з різним зазором між ВСП і поверхнею ОК за рахунок кращих технічних характеристик такого транзистора, зокрема високого входного опору, граничної частоти і крутизни перехідної характеристики.

2. Удосконалення та дослідження СКЧА дефектоскопа. Для налаштування ВД у режим максимальної чутливості під час контролю матеріалів із різними електрофізичними властивостями резонансну частоту робочого контуру АГ необхідно переналаштовувати, для чого використовують конденсатори змінної ємності. У застарілих автогенераторних ВД регулювання частоти проводиться за допомогою змінних конденсаторів із повітряним або твердим діелектриком, суттєвим недоліком яких є великі габарити і низька надійність. Перспективнішим є електронний спосіб налаштування за допомогою напівпровідникових діодів (варикапів), ємність яких залежить від прикладеної до p - n -переходу зворотної (запірної) напруги. Невеликі габарити варикапів дозволяють розміщувати їх поблизу активного елементу АГ.

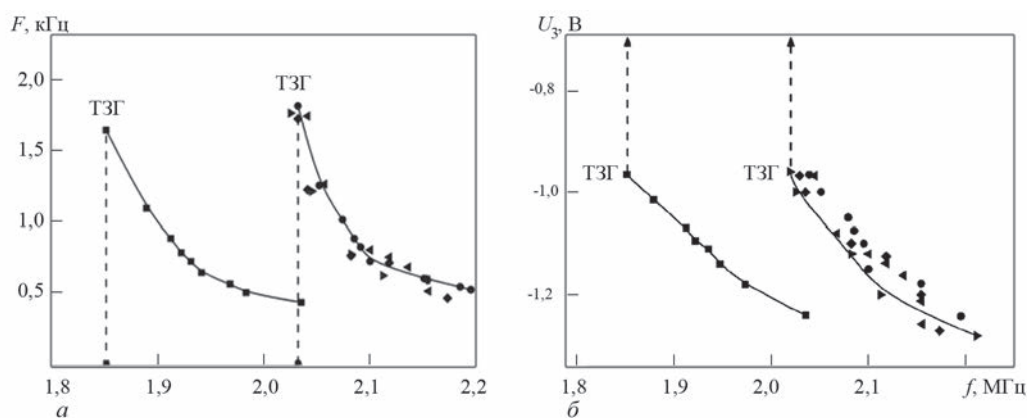


Рис. 5. Залежність частоти F слідування серій високочастотних коливань (а) і напруги зміщення U_3 (б) АГ у діапазоні контролю високопровідних матеріалів від робочої частоти f під час розміщення ВСП у «повітрі» (■) і на СЗ з ПЕП 11,0 МСм/м (●); 14,8 МСм/м (◄); 30,4 МСм/м (►) та 51,8 МСм/м (◆)

Таблиця 1. Порівняння чутливості ВД з АГ на транзисторах різного типу

Тип транзистора	ВСП на СОП 5-1			ВСП на СОП 5-2			ВСП на СОП 5-3		
	F_1	F_2	ΔF	F_1	F_2	ΔF	F_1	F_2	ΔF
2П 303	2,38	2,22	0,16	3,23	2,71	0,52	3,23	2,63	0,60
2П 305	1,59	1,35	0,24	2,33	1,70	0,63	2,50	1,72	0,78

Довжина виводів для керування ємністю варикапа не є критичною величиною, так як керування проводиться постійною напругою. Плавність налаштування за допомогою потенціометру є кращою, ніж у змінного конденсатора. Наприклад, змінний резистор типу СПЗ-33 дозволяє повертати вісь на кут до 320° , що у 1,8 рази перевищує кут повороту змінного конденсатора. Варикапи давно відомі, але тільки нещодавно промисловість освоїла випуск варикапів високої добротності ($Q \approx 200$) із діапазоном переналаштування по ємності від 30 до 600 пФ і малими габаритами ($3,8 \times 1,6$ мм). Порівняльний аналіз показав, що найперспективнішим для побудови автогенераторних ВД є варикап типу ВВ 112, який крім високої добротності має найкращий коефіцієнт перекриття і температурну стабільність. Варикап ВВ 112 керується напругою від 0,5 до 8,0 В, що робить його придатним для приладів з автономним живленням. Важливо, що варикап ВВ 112 має найменший зворотний струм $I_{зв}$, який є постійним паразитним струмом, що протікає через варикап у зворотному напрямку за заданої зворотної напруги.

Головним недоліком варикапів є невисока добротність, яка навіть у найкращих варикапів на порядок менша за добротність керамічних конденсаторів і на два-три порядки менша за добротність повітряних конденсаторів. Проведемо оцінювання можливого впливу варикапу типу ВВ 112 з добротністю $Q_B = 200$ на добротність коливальної системи у цілому, для чого скористаємось виразом для еквівалентної добротності Q_E коливальної системи з паралельно з'єднаних конденсатора та індуктивності обмотки ВСП з добротністю $Q_{ВСП}$ [13], який має вигляд $Q_E = Q_{ВСП} Q_B / Q_{ВСП} + Q_B$. Для використаного базового ВСП добротність обмотки $Q_{ВСП}$ залежно від матеріалу ОК має значення від 11,0 до 24,0. Очевидно, що у цьому випадку добротність коливальної системи АГ буде обмежена переважно добротністю обмотки ВСП. Підключення варикапу типу ВВ 112 зменшує добротність коливальної системи АГ на 10...12 %, що можна вважати несуттєвим, зважаючи на інші

переваги, тим більше, що наведена оцінка характеризує найгірший випадок, коли добротність варикапу найменша при мінімальному значенні керуючої напруги $U_{\min} = 0,5$ В.

У режимі роботи варикапа необхідно враховувати його вольт-фарадну характеристику, дослідження якої для варикапу ВВ 112 проведено за допомогою вольтметра типу М 890 F і вимірювача CLR 2 типу Е 7-13 (рис. 6, а). Варикап VD підключається до потенціометра VR 1 через резистор $R = 100$ кОм, роль якого полягає у захисті варикапу VD і вимірювача CLR 2 типу Е 7-13 при нижньому положенні рухомого електроду потенціометра VR. Напруга на резисторі R має бути набагато меншою за найменше значення напруги керування $U_{\min} = 0,5$ В. Напруга на резисторі R визначається зворотним струмом варикапу ($I_{зв} = 5 \cdot 10^{-8}$ А) і дорівнює $R \cdot I_{зв} = 5$ мВ, тобто $R \cdot I_{зв} \ll U_{\min}$, що дозволяє знехтувати впливом резистора R на похибку вимірювання. Конденсатор C введено для захисту вимірювача CLR типу Е 7-13 від попадання постійної напруги. При цьому ємність $C = 0,1$ мкФ, тобто вибрана набагато більшою за максимальну ємність варикапу ($C_{\max} = 620$ пФ), що дозволяє знехтувати її впливом.

Вольт-фарадна характеристика варикапа ВВ 112 (рис. 6, б) має нелінійний характер. Мінімальне та максимальне значення напруги керування мають значення $U_{\min} = 0,5$ В і $U_{\max} = 8$ В відповідно. Із рис. 6, б видно, що зміна керуючої напруги від 6 до 8 В несуттєво впливає на ємність варикапу. Тому максимальне значення керуючої напруги доцільно обмежити 6 В, за якої мінімальне значення ємності варикапа $C_{\min}$ дорівнює 50 пФ.

Ефективність електронного керування частотою АГ залежить від схеми підключення варикапу в коливальний контур. Традиційне підключення варикапу для управління частотою АГ наведено на рис. 7, а [13, 14]. За традиційною схемою включення варикапу VD за невеликої напруги керування він починає проводити струм під час від'ємної півхвилі височастотних коливань АГ, що призводить до їх спотворення. Крім того, ко-

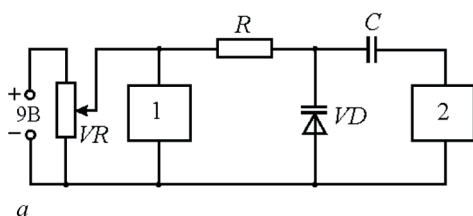
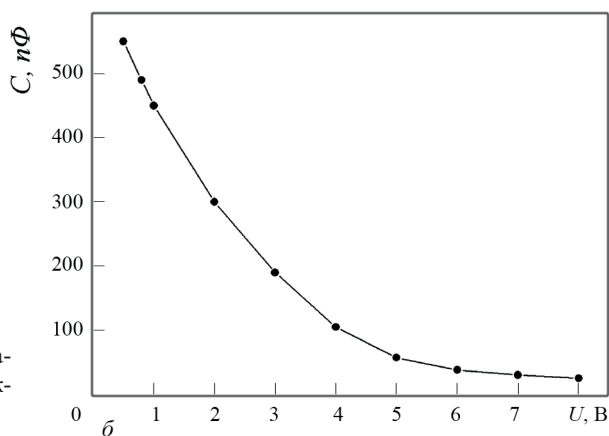


Рис. 6. Схема дослідження вольт-фарадних характеристик варикапів (а) і вольт-фарадна характеристика варикапу типу ВВ 112 (б)



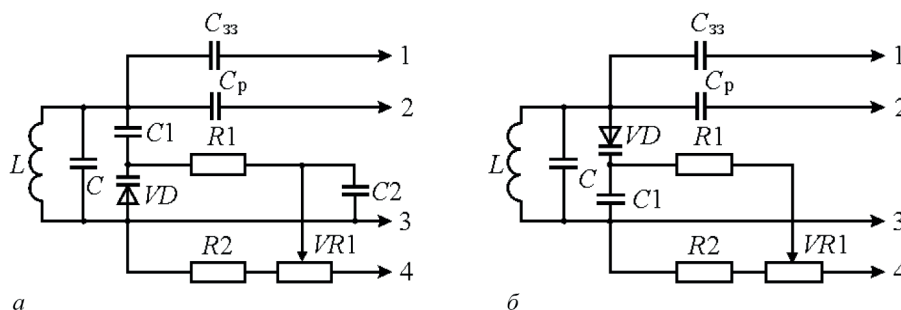


Рис. 7. Традиційна (а) і запропонована (б) схеми підключення варикапу VD у робочий контур АГ: 1–4 – виводи зворотного зв'язку АГ, керуючого електрода активного елементу АГ, загального проводу та напруги живлення відповідно

ливальний контур отримує додаткове навантаження, що призводить до зменшення його добротності та чутливості, до змін параметрів ВСП. Вплив цього фактору зменшено у запропонованій схемі включення варикапу в робочий контур АГ (Учанін В.М., Черленевський В.В. Пристрій для вихрострумове контролю. України пат. 42132, 2009, Бюл. № 12). У запропонованій схемі (рис. 7, б) за малої керуючої напруги струм варикапу буде впливати на позитивну півхвилю високочастотних коливань. Але вона впливає на роботу кола автоматичного зміщення, яке підтримує рівень амплітуди коливань незмінним. Крім того, у запропонованій схемі за рахунок фільтрації елементами R1 і C1 зменшено вплив шумів, що вносяться у робочий контур АГ рухомими контактами змінного резистора VR, які можуть досягати 15...50 мВ. Це дозволяє досягнути точнішого налаштування АГ у режим, близький до зриву генерації, та в повній мірі використати високу чутливість схеми.

Розглянемо вплив ємності варикапу на амплітудно-частотні характеристики (АЧХ) коливальної системи автогенераторного ВД (рис. 1). При цьому АГ переведено у режим регенеративного підсилювача високої частоти, для чого генерація була зірвана шляхом зменшення напруги живлення активного елементу. ВСП підключався до АГ дефектоскопа за допомогою коаксіального кабелю, який є частиною коливальної системи [15]. Для усунення шунтування робочого контуру низьким вихідним опором генератора сигнал зовнішнього генератора вводився через конденсатор зв'язку ємністю 10 пФ, так як вона має бути набагато меншою за мінімальне значення ємності робочого контуру. Мінімальне значення ємності робочого контуру дорівнює 150 пФ, так як воно, згідно з поданими вище оцінками, складається з ємності кабелю (100 пФ) і найменшого значення ємності варикапу ($C_{\min} = 50$ пФ). Для виключення впливу елементів кола автоматичного зміщення на АЧХ коливальної системи амплітуда напруги зовнішнього генератора вибрана величиною в 1 В. При цьому амплітуда напруги на робочому контурі не перевищує 15 мВ, тобто є набагато меншою за на-

пругу 200 мВ, за якої починає працювати діод 6 (рис. 1) кола автоматичного зміщення АГ. Мілівольтметр підключали до стокового контуру транзистора 9 (рис. 1) за допомогою високочастотної головки. Дослідження проводили, розміщуючи ВСП у «повітрі» за найбільших значень ємності варикапу та ВСП – на бездефектній частині СЗ типу СОП 5-1 (алюмінієвий сплав Д16) за найбільших і найменших значень ємності варикапу.

Кожна з отриманих АЧХ (рис. 8) має два резонансні максимуми, що характерно для двоконтурної коливальної системи АГ. При цьому амплітуда максимуму опорного контуру є більшою за амплітуду максимумів робочого контуру в усьому діапазоні зміни ємності варикапу, що пояснюється більшою добротністю опорного контуру порівняно з добротністю робочого контуру ($Q_{\text{оп}} \approx 90$, $Q_{\text{роб}} \approx 20$). При встановленні ВСП на СЗ амплітуда у точках обох максимумів знижується для всіх режимів, що пояснюється зменшенням добротності обмотки ВСП при взаємодії з СЗ із алюмінієвого сплаву. При зміні ємності варикапу з мінімального ($C_{\min} = 50$ пФ) до максимального ($C_{\max} = 620$ пФ) значення резонансної частоти робочого контуру збільшується на 1,3 МГц і резонансні частоти контурів зближуються. Одночасно збільшуєть-

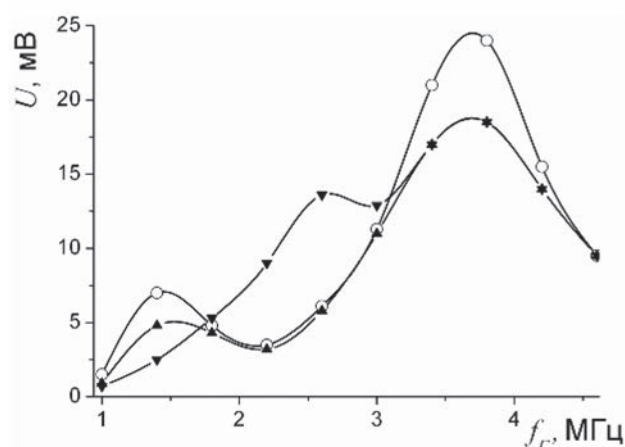


Рис. 8. Амплітудно-частотні характеристики коливальної системи АГ ВД: за розміщення ВСП у «повітрі» за найбільшого значення ємності варикапу (○) і на бездефектній частині СЗ із алюмінієвого сплаву за найбільших (▼) і найменших (▲) значень ємності варикапу

Таблиця 2. Порівняння чутливості АГ із різним включенням варикапу

Схема	ВСП на СОП 5-1			ВСП на СОП 5-2			ВСП на СОП 5-3		
	F_1	F_2	ΔF	F_1	F_2	ΔF	F_1	F_2	ΔF
Традиційна (рис. 7, а)	1,59	1,35	0,24	2,33	1,70	0,63	2,50	1,72	0,78
Запропонована (рис. 7, б)	1,61	1,28	0,33	2,13	1,22	0,91	2,33	1,28	1,05

ся амплітуда у точці максимуму характеристики робочого контуру. При цьому резонансна частота опорного контуру помітно не змінюється, що також можна пояснити більшою добротністю опорного контуру.

Наведену методику визначення АЧХ коливальних систем використано для налаштування ВД під час їх виробництва, так як вона дозволяє виявити елементи з низькою добротністю (наприклад, неякісні конденсатори) і за рахунок покращення повторюваності характеристик ВД забезпечити взаємозамінність ВСП.

Порівняння чутливості автогенераторних ВД при використанні традиційної і нової СКЧА проведено за методикою, поданою вище, де за критерій чутливості прийнято змiну $\Delta F = F_1 - F_2$ частоти проходження серій височастотних коливань при внесенні у робочий контур додаткового опору 47 кОм при встановленні ВСП на бездефектну частину СЗ із алюмінієвого сплаву (СОП 5-1), титанового сплаву (СОП 5-2) і феромагнітної сталі (СОП 5-3). Усі досліджувані макети ВД побудовано на польовому транзисторі з ізолюваним затвором. Результати вимірювань наведено у табл. 2.

Представлені у табл. 2 результати показують, що чутливість ВД із запропонованою СКЧА більша за чутливість традиційної схеми у 1,38; 1,44 і 1,35 рази для алюмінієвих, титанових сплавів і феромагнітних сталей відповідно, тобто дозволяє досягнути збільшення чутливості під час контролю всіх конструкційних матеріалів.

3. Удосконалення та дослідження СРКА. Основною функцією СРКА є швидке поновлення коливань АГ після виявлення дефекту і відповідного зриву генерації, яке здійснюють покращенням умов генерації коливань шляхом збільшення напруги живлення. У перших автогенераторних ВД такі схеми були відсутні і поновлення генерації здійснювалось відведенням ВСП від поверхні ОК [1]. Відведення ВСП від поверхні ОК збільшує його добротність і, відповідно, зменшує втрати у коливальному контурі. Очевидно, що така процедура поновлення коливань АГ ускладнює методику і продуктивність контролю. У подальшому для регенерації коливань використовували релаксаційні генератори, які включалися у коло живлення активного елементу АГ і запускалися після зриву його коливань. Періодичне збільшення напруги живлення активного елементу автогенератора призводить до покращення умов поновлення генерації. Автогенераторний ВД типу ТВД, зокрема,

містить у своєму складі СРКА, у якій релаксаційний генератор складається з струмостабілізуючого елемента, лінії затримки на одноперехідному транзисторі з RC-колом, яке задає частоту релаксаційних коливань, і ключа, перемикання якого призводить до періодичного збільшення напруги живлення [4].

Аналіз умов, що сприяють поновленню коливань АГ, дозволив запропонувати нову СРКА (Учанін В.М., Черленевський В.В. Вихрострумовий автогенераторний дефектоскоп. України пат. 39217, 2009, Бюл. № 3), яка за рахунок високої швидкодії дозволяє значно підвищити продуктивність контролю порівняно з аналогами і яка, у принципі, може працювати з АГ на різних активних елементах. Розглянемо роботу вдосконаленої СРКА (рис. 9–11). Під час встановлення ВСП 1 на бездефектну ділянку ОК автогенератор 2 генерує переривчасті коливання поблизу точки зриву генерації (ТЗГ на рис. 4, 5), які прослуховуються у вигляді змінно-тонального звучання звукового індикатора 6. При появі дефекту добротність ВСП 1 зменшується, що призводить до зменшення добротності робочого контуру АГ 2 і зриву коливань. Вихідний сигнал АГ 2 через конденсатор 4 надходить на підсилювач-обмежувач 5, який формує сигнал звукової частоти. Цей сигнал надходить на звуковий індикатор 6 і на вхід формувача сигналу дефекту 7, який при його появі формує короткий імпульс, амплітуда якого змінюється від величини напруги живлення до нуля. Короткий імпульс через діод D4 схеми керування напругою живлення 10 надходить на транзисторний регулятор струму Т2 (рис. 11). Транзистор регулятора струму Т2 відкривається, що призводить до збільшення напруги живлення АГ 2, внаслідок чого переривчасті коливання АГ 2 поновлюються за умови, що ВСП 1 зміщений з дефекту, і АГ 2 готовий до подальшої роботи. Під час знаходження ВСП на дефекті процес зниження і наступного збільшення живлення АГ 2 повторюється з частотою близько 100 Гц. Частота слідування цих імпульсів знаходиться у звуковому діапазоні та після підсилення реєструється звуковим індикатором 6. Короткий імпульс з виходу формувача сигналу від дефекту 7 надходить на розширювач імпульсів 8, який збільшує довжину імпульсу для засвічування світлового індикатора дефекту 9.

Роботу елементів СРКА досліджували, реєструючи сигнали у різних елементах СРКА за допомогою цифрового осцилографу типу TDS 1012

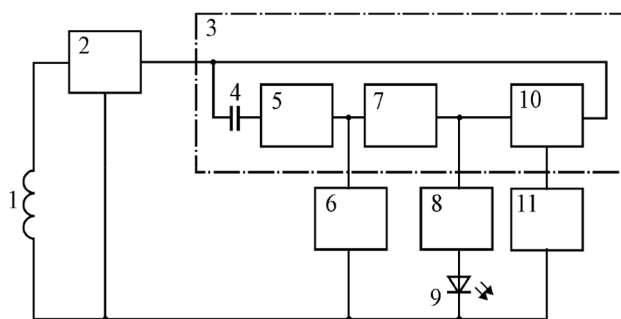


Рис. 9. Структурна схема ВД із вдосконаленою СРКА

із модулем розширення TDS 2CMA (див. рис. 12, 13). Ціна поділки по вертикалі – 1 В, по горизонталі – 2,5 мс. Крім того, нижче розраховано параметри окремих елементів СРКА.

Підсилювач-обмежувач 5 (рис. 9, 10) виконано на транзисторі Т1, який включено по схемі із загальним емітером зі зворотним від'ємним зв'язком по напрузі через резистор зворотного зв'язку $R_{зз}$. Розділювальний конденсатор 4 (рис. 9) пропускає на базу транзистора Т1 тільки змінну складову вихідної напруги АГ. Діод D1 усуває від'ємну півхвилю вхідного сигналу і здійснює його прив'язку до рівня логічного нуля. На рис. 12, а, б зображено сигнали на виході АГ (до конденсатора 4), а на рис. 12, в, г – сигнали на базі транзистора Т1 підсилювача-обмежувача 5 за відсутності дефекту і при розміщенні ВСП на дефекті відповідно. При розміщенні ВСП поза дефектом

(рис. 12, а) на виході АГ спостерігаються стабільні коливання з частотою 1 кГц і амплітудою близько 1 В разом із постійною складовою напруги живлення 6 В. При розміщенні на дефекті (рис. 12, б) спостерігається зрив коливань. Коливальний процес загасає через низьку добротність робочого контуру ВСП при розміщенні його на дефекті і напруга живлення зменшується до рівня землі за рахунок збільшення струму споживання АГ. Це спричиняє повторний зрив генерації, про що свідчать ділянки пропуску сигналу на рис. 12, б, г. Поки ВСП знаходиться на дефекті, цей процес повторюється з частотою близько 100 Гц. Після конденсатора (рис. 12, в, г) лишається змінний корисний сигнал без постійної складової, який несе інформацію про положення ВСП на поверхні ОК або про дефект. Транзистор Т1 *n-p-n*-типу працює у ключовому режимі та керується сигналом позитивної полярності: за відсутності сигналу транзистор закритий, струм відсутній та на колекторі встановлюється напруга живлення 6 В. Підсилений сигнал на колекторі транзистора Т1 (рис. 12, д, е) обмежений знизу рівнем потенціалу землі, а зверху – напругою живлення. Проміжки часу на рис. 12, е, у яких сигнал відсутній, свідчать про знаходження ВСП на дефекті. Транзистор Т1 повинен підсилювати мінімальне значення вихідного сигналу АГ до рівня напруги живлення $E_{ж}$, тобто з перевищенням за-

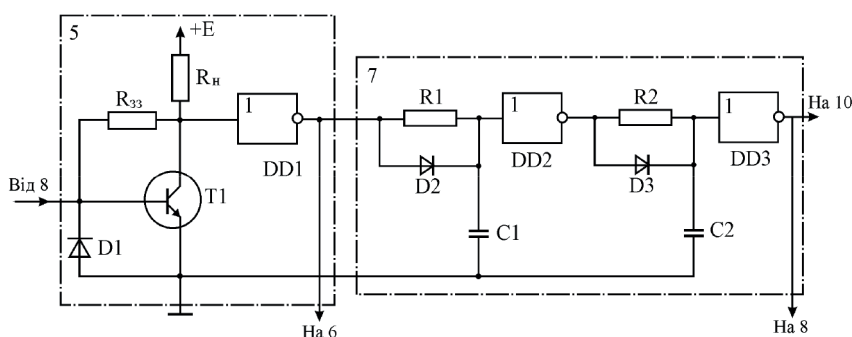
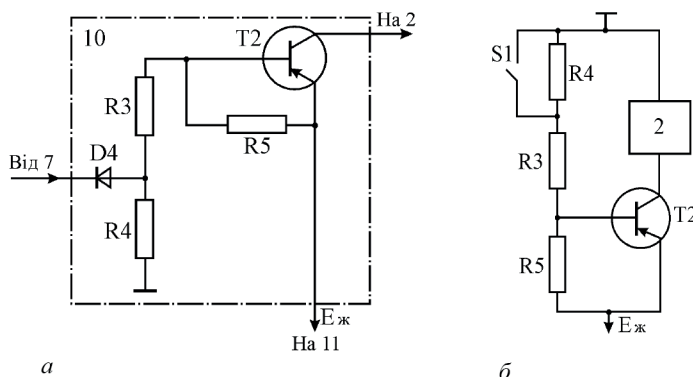
Рис. 10. Схема підсилювача-обмежувача і формувача сигналу дефекту СРКА: D1 – діод; $R_{зз}$ – резистор зворотного зв'язку; R1, R2, C1, C2, D2 і D3 – інтегровані діодні кола; DD1, DD2, DD3 – інвертори

Рис. 11. Схема керування напругою живлення (а) та її еквівалентна схема (б): D4 – комутаційний діод; R3 і R5 – опори подільника базової напруги; Т2 – транзисторний регулятор струму; 2 – АГ; S1 – перемикач

безпечувати рівень логічної «1». Мінімальна вихідна напруга $U_{\min}$ дорівнює близько 0,2 В, а рівень напруги живлення 6 В. Звідси коефіцієнт підсилення підсилювача-обмежувача повинен відповідати умові $K \geq E_{\text{ж}}/U_{\min} = 30$. Для вибраного максимального колекторного струму транзистора $I_{\text{к}} = 0,4$ мА опір навантаження буде дорівнювати $R_{\text{к}} = E_{\text{ж}}/I_{\text{к}} = 15$ кОм. Так як коефіцієнт підсилення K дорівнює відношенню $K = R_{\text{зз}}/R_{\text{н}}$, то для забезпечення необхідного підсилення опір зворотного зв'язку $R_{\text{зз}}$ вибраний більшим за 450 кОм. Сигнал з виходу логічного інвертора DD1 формує змінно-тональну інформацію про дефект і положення ВСП на поверхні ОК та надходить на блок звукової індикації 6, який складається з підсилювача низької частоти і головних телефонів оператора. Логічний інвертор DD1 виконує інверсію сигналів і додатково підсилює їх до рівня напруги живлення для покращення прямокутної форми сигналу (рис. 12, ж, з). Для побудови логічного інвертора DD1 використано мікросхему MC 14069 UDP фір-

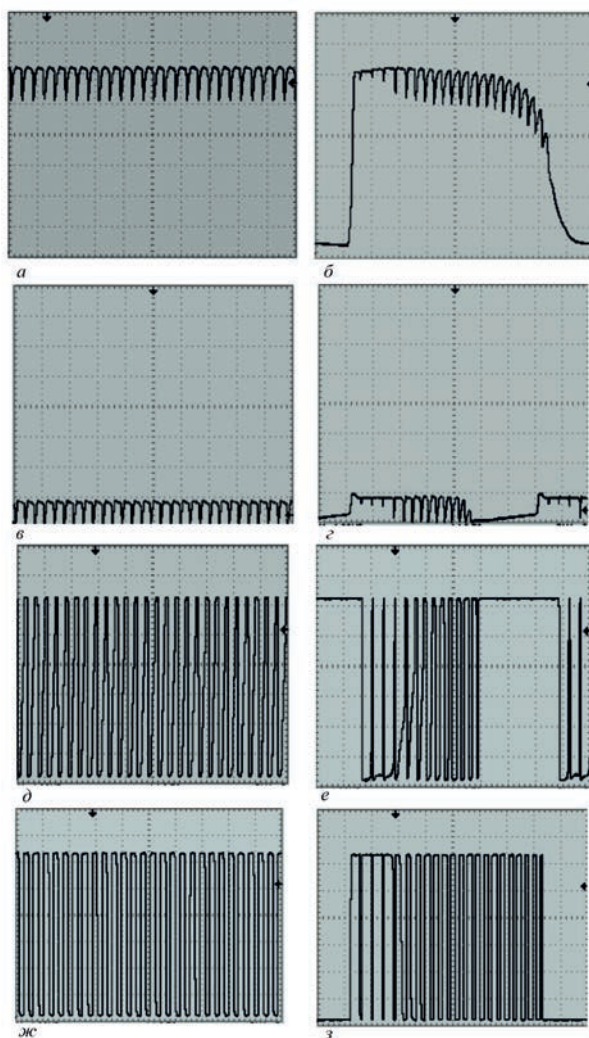


Рис.12. Сигнали СРКА за відсутності дефекту (ліворуч) і при знаходженні ВСП на дефекті (праворуч): а, б – на вході СРКА; б, з – на базі транзистора Т1; д, е – на вході інвертора; ж, з – на виході інвертора DD1 (рис. 10)

ми Motorola, яка має 6 окремих інверторів, що використовується також для інших елементів СРКА. Параметри схеми: вихідний рівень логічного «0» $\leq 1\% E_{\text{ж}}$, вихідний рівень логічної «1» $9,95\% E_{\text{ж}}$, вхідний рівень логічного «0» $\leq 20\% E_{\text{ж}}$, вхідний рівень логічної «1» $\geq 80\% E_{\text{ж}}$. Напруга живлення $E_{\text{ж}}$ може бути вибраною у діапазоні 3...18 В.

Сигнал звукової частоти з виходу інвертора DD1 надходить на формувач сигналу, який для загострення імпульсу сигналу від дефекту виконаний у вигляді двох послідовно з'єднаних інтегровальних кіл R1-C1-D2 і R2-C2-D3 з інверторами DD2 і DD3 (рис. 10). Постійна часу інтегровальних кіл $\tau = R \cdot C$ вибирається такою, щоби згладити сигнал звукової частоти 1...3 кГц, що відповідає бездефектній ділянці ОК. Для заглушення сигналу інтегровальне коло відіграє роль фільтра. Тому коефіцієнт заглушення визначимо рівним $k_{\text{з}} = U_{\text{вх}}/U_{\text{вих}} \geq 100$. Звідси параметри еквівалентної схеми інтегровального кола визначаються співвідношенням $(R + X_{\text{с}})/X_{\text{с}} \geq 100$ або $R \geq 99X_{\text{с}}$, де R і $X_{\text{с}}$ – активний і реактивний опори резистора і конденсатора інтегровальних кіл (рис. 10). Ємність конденсатора вибрано величиною 47 нФ. Тоді для найнижчої частоти сигналу (1 кГц), що має бути заглушеним, реактивний опір $X_{\text{с}} = 3390$ Ом. Звідси опір R резистора слід вибирати більшим за 3390 Ом.

На рис. 12, а на рівні логічної «1» спостерігаються залишки звукового сигналу частотою близько 1 кГц, які зникають після наступних інтегровальних кіл (рис. 13, в, д, ж), і сигнал на бездефектній ділянці згладжений. При цьому низькочастотні сигнали з частотою слідування серій імпульсів близько 100 Гц, які відповідають періодичним зривам коливань АГ при положенні ВСП на дефекті, інтегровальні кола пропускають. За допомогою інверторів DD2 і DD3 формується короткий імпульс (рис. 13, з) з крутими фронтами для запуску схеми керування напругою живлення, який також надходить на розширювач імпульсу 8 (рис. 9) для формування імпульсу, призначеного для спрацювання світлодіода. На рис. 13, б спостерігається початок формування імпульсного сигналу від дефекту за відсутності переривчастої генерації при знаходженні ВСП на дефекті. Амплітуда сигналу в інтервалі часу $t_2 - t_3$ спадає за експоненціальним законом $U(t) = E_{\text{ж}} e^{-t/\tau}$, де $U(t)$ – напруга у момент часу t . Круті фронти імпульсного сигналу від дефекту досягаються шляхом введення діода D2, через який в момент часу t_1 проходить швидкий заряд конденсатора C1. Конденсатор C1 повільно розряджається через резистор R1. Подальше формування сигналу від дефекту проходить аналогічно на другому інтегровальному колі R2C2 і інверторі DD3. На бездефектній ділянці ОК на виході інтегровального

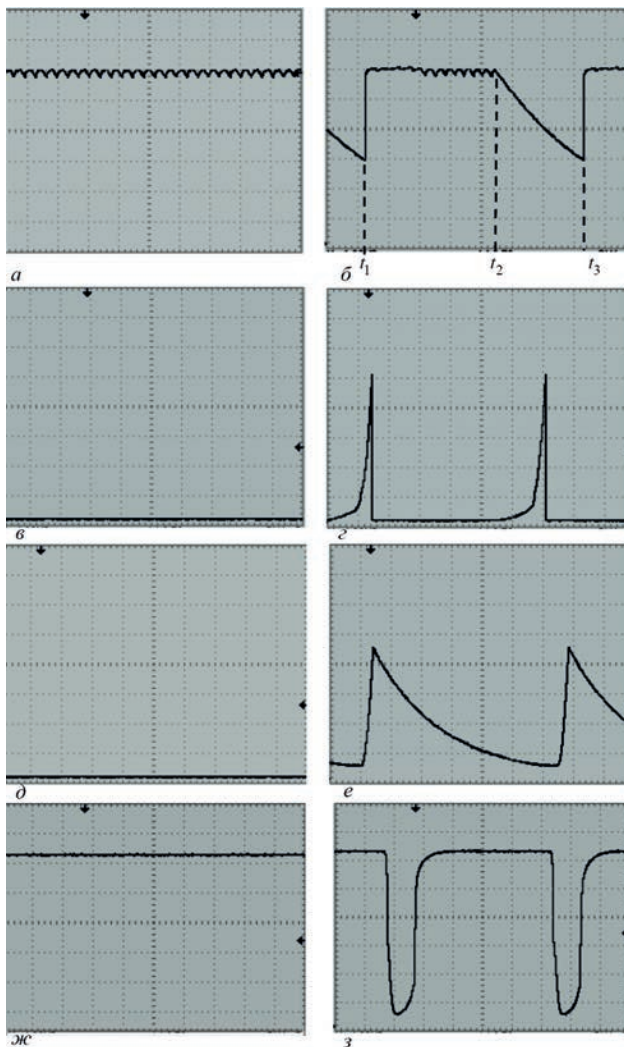


Рис. 13. Сигнали СРКА за відсутності дефекту (ліворуч) і при знаходженні ВСП на дефекті (праворуч): а, б – на вході інвертора DD2; в, з – на виході інвертора DD2; д, е – на вході інвертора DD3; ж, з – на виході інвертора DD3

кола R2C2 спостерігається лінія на рівні логічного «0» (рис. 13, д). На дефекті (рис. 13, е) сигнал на виході інтегровального кола R2C2 швидко зростає за рахунок заряду конденсатора C2 через діод D2 і повільно спадає за експоненціальним законом через розряд на резистор R2. На виході інвертора DD3 виникає від'ємний короткий імпульс з крутими фронтами тривалістю близько 2,5 мс, що сигналізує про дефект (рис. 13, з). Сигнал на виході логічного інвертора DD3 за відсутності дефекту має тільки постійну складову на рівні логічної «1» (рис. 13, ж). Сигнал від дефекту (рис. 13, з) надходить на схему керування напругою живлення АГ, яка являє собою кероване джерело струму на транзисторі T2 *p-n-p*-типу, включеного по схемі із загальним емітером (рис. 13, а). На еквівалентній схемі (рис. 13, б) електронний перемикач на діоді D4 замінено на перемикач S1. Напруга живлення $E_{ж}$ розподіляється на напругу колектор-емітер $U_{ке}$ транзистора T2 і напругу $U_{аг}$ АГ $E_{ж} = U_{аг} + U_{ке}$. Опори R3, R4 і R5 входять до складу подільни-

ка базової напруги транзистора T2 і визначають струм у ньому згідно зі співвідношенням $I = E_{ж} / (R_3 + R_4 + R_5)$. У свою чергу, зміна базового струму впливає на колекторний струм транзистора T2, який проходить через активний елемент АГ 2. При зриві генерації на дефекті на виході формувача 7 (інвертор DD3) формується імпульс, який на 2,5 мс замикає катод діода D4 на землю і зменшує за рахунок шунтування вплив резистора R4. На еквівалентній схемі це моделюється замиканням перемикача S1 на землю. При цьому напруга база-емітер $U_{бе}$ транзистора T2 збільшується, що зменшує еквівалентний опір транзистора T2 і напругу $U_{ке}$ на ньому. За рахунок перерозподілу стабілізованої напруги збільшується напруга на активному елементі АГ, що призводить до відновлення його генерації.

Перевага запропонованої СРКА полягає в тому, що крім швидкого поновлення коливальних АГ після їх зриву вона забезпечує зручне підключення звукового і світлового індикаторів та використання інтегральних КМОП логічних інверторів з малим струмом споживання ($1,5 \cdot 10^{-6}$ А) і невеликою напругою живлення.

Висновки

Для створення автогенераторних ВД перспективною є схема АГ з двоконтурною коливальною системою, яка працює у режимі переривчастої генерації. Запропоновано і досліджено нові технічні рішення, зокрема схему АГ на польовому транзисторі з ізолюваним затвором, схему керування частотою генерації та схему регенерації коливальних АГ. Показано їх переваги щодо чутливості порівняно з традиційними схемами. Проаналізовані технічні рішення використано для створення автогенераторних ВД для виявлення поверхневих тріщин типу ВД 3.03Н, ВД 3.02Н, ВД 4.01Н і ВД 4.03Н, які пройшли державні випробування і які занесено у державний реєстр засобів вимірювальної техніки. Їх використовують для технічного обслуговування літаків ДП «Антонов» та авіаційних двигунів ДП «Івченко-Прогрес» і ПАТ «Мотор-Січ». Прилади також впроваджено в авіакомпанії «Міжнародні Авіалінії України», на Львівському та Конопольському авіаремонтних заводах, ГПУ «Львівгазвидобування», НВФ «Зонд», ПАТ «Західенерго», Карпатському та Полтавському ЕТЦ тощо.

Практика НК із використанням розроблених ВД підтвердила ефективність представлених у цій статті технічних рішень. Передбачається їх використання у новому інтелектуалізованому автогенераторному ВД, у який додатково введено автоматичне налаштування на заданий методикою контролю рівень чутливості та індикація рівня чутливості.

Стаття присвячена світлій пам'яті талановитого інженера Всеволода Вадимовича Черленевського,

за безпосередньої участі якого винайдено представлені у статті нові технічні рішення і виконано частину вимірювань.

Список літератури

1. Дорофеев А.Л., Казаманов Ю.Г. (1980) *Электромагнитная дефектоскопия*. Москва, Машиностроение.
2. Герасимов В.Г., Покровский А.Д., Сухоруков В.В. (1992) *Неразрушающий контроль. В 5 кн. Кн. 3. Электромагнитный контроль: Практи. пособие*. Сухоруков В.В. (ред.). Москва, Высшая школа.
3. Билик Ю.З., Дорофеев А.Л. (1981) Электромагнитные дефектоскопы типа «Проба». *Дефектоскопия*, **6**, 53–58.
4. (1989) *Вихретоковый дефектоскоп типа ТВД-А. Техническое описание и инструкция по эксплуатации*. М., Министерство гражданской авиации.
5. Арш Э.И., Твердоступ Н.И., Хандецкий В.С. (1981) Особенности построения автогенераторных измерителей на лямбда-диодах. *Измерительная техника*, **1**, 53–55.
6. Алексеев А.П., Сайманин А.Е., Шатерников В.Е. (1989) Вопросы автоматического проектирования вихретоковых автогенераторных дефектоскопов, построенных на лямбда-диодах. *Дефектоскопия*, **12**, 51–55.
7. Серебренников С.В., Хандецкий В.С. (1983) *Сопоставительное исследование метрологических характеристик автогенераторных преобразователей с различным включением контуров*. В кн.: Приборостроение. Вып. 34, Киев, Техника, 35–38.
8. Арш Э.И. (1976) *Автогенераторные измерения*. Москва, Энергия.
9. Гоноровский И.С. (1977) *Радиотехнические цепи и сигналы*, 3-е изд. Москва, Сов. Радио.
10. Учанин В.Н. (2010) Автогенераторные вихретоковые дефектоскопы: основные принципы, классификация, сравнительный анализ (Обзор). *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **2**, 18–23.
11. Uchanin, V. (2021) Enhanced eddy current techniques for detection of surface-breaking cracks in aircraft structures. *Transactions on Aerospace Research*, **1(262)**, 1–14. DOI:https://doi.org/10.2478/tar-2021-0001
12. (2002) *Цифровые запоминающие осциллографы серии TDS1000 и TDS2000. Руководство пользователя*. США, Tektronix Inc.
13. Шитиков Г.Т. (1983) *Стабильные автогенераторы метровых и дециметровых волн*. Москва, Радио и связь.
14. Ленк Д. (1979) *Справочник по проектированию электронных схем*. Киев, Техніка.
15. Учанин В.М. (2022) Оптимізація конструкції вихрострумового перетворювача параметричного типу для

виявлення поверхневних тріщин. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, **1**, 11–21. DOI:https://doi.org/10.37434/tdnk2022.01.01

References

1. Dorofeev, A.L., Kazamanov, Yu.G. (1980) *Electromagnetic flaw detection*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
2. Gerasimov, V.G., Pokrovsky, A.D., Sukhorukov, V.V. (1992) *Non-destructive testing. In: 5 Books. Book 3: Electromagnetic testing*. Moscow, Vysshaya Shkola [in Russian].
3. Bilik, Yu.Z., Dorofeev, A.L. (1981) Electromagnetic flaw detectors of «Proba» type. *Defektoskopiya*, **6**, 53–58 [in Russian].
4. (1989) *Eddy current flaw detector of TVD-A type. Technical description and operating instruction*. Moscow, Ministry of Civil Aviation [in Russian].
5. Arsh, E.I., Tverdstup, N.I., Khandetsky, V.S. (1981) Features of construction of self-oscillating meters on lambda-diodes. *Izmeritel'naya Tekhnika*, **1**, 53–55 [in Russian].
6. Alekseev, A.P., Sajmanin, A.E., Shaternikov, V.E. (1989) Problems of automatic design of eddy current self-oscillating flaw detectors built on lambda-diodes. *Defektoskopiya*, **12**, 51–55 [in Russian].
7. Serebrennikov, S.V., Khandetsky, V.S. (1983) *Comparative examination of metrological characteristics of self-oscillating transducers with different turn on the circuit*. In book: Instrument-making industry. Issue 34. Kyiv, Tekhnika, 35–38 [in Russian].
8. Arsh, E.I. (1976) *Self-oscillating measurements*. Moscow, Energiya [in Russian].
9. Gonorovsky, I.S. (1977) *Radio circuits and signals*. 3rd Ed., Moscow, Sov. Radio [in Russian].
10. Uchanin, V.N. (2010) Self-oscillating eddy current flaw detectors: Main principles, classification, comparative analysis (Review). *Tech. Diagnost. and Non-Destructive Testing*, **2**, 18–23 [in Russian].
11. Uchanin, V. (2021) Enhanced eddy current techniques for detection of surface-breaking cracks in aircraft structures. *Transact. on Aerospace Research*, **1(262)**, 1–14. DOI:https://doi.org/10.2478/tar-2021-0001
12. (2002) *Distinguished Service Order of series TDS1000 and TDS2000. User manual*. USA, Tektronix Inc.
13. Shitikov, G.T. (1983) *Stable self-oscillators of meter and decimeter waves*. Moscow, Radio i Sviaz [in Russian].
14. Lenk, D. (1979) *Handbook on design of electronic circuits*. Kyiv, Tekhnika [in Russian].
15. Uchanin, V.M. (2022) Optimization of the design of eddy current probe of parametric type to detect surface cracks. *Tekh. Diagnost. ta Neruiniv. Kontrol*, **1**, 11–21 [in Ukrainian]. DOI:https://doi.org/10.37434/tdnk2022.01.01

ANALYSIS OF OPERATION OF A DUAL-CIRCUIT AUTOGENERATOR EDDY CURRENT FLAW DETECTOR IN INTERMITTENT GENERATION MODE

V.M. Uchanin

G.V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of NASU. 5 Naukova str., 79060, Lviv, Ukraine. E-mail: vuchanin@gmail.com

Timely application of non-destructive methods for testing critical structures of modern engineering is an important factor of ensuring their safe and trouble-free operation. Eddy current testing means have no alternative for contactless detection of cracks in aircraft structures. In order to detect surface cracks (also through a layer of dielectric coating), autogenerator eddy current flaw detectors are used, working at operating frequencies above 1 MHz. To develop such flaw detectors, it is promising to use dual-circuit oscillatory system, operating in intermittent generation mode. This work is a study of new technical solutions, in particular, autogenerator circuit based on a field transistor with an insulated gate, circuit of controlling the generation frequency and circuit of regeneration of autogenerator oscillations. Their advantages in terms sensitivity are shown, compared to the traditional circuits. The analyzed engineering solutions were used to develop autogenerator eddy current flaw detectors of VD 3.03N, VD 3.02N, VD 4.01N and VD 4.03N type for surface crack detection, which have passed state testing and are widely used, in particular, for maintenance of SC «Antonov» aircraft and SC «Ivchenko-Progress» and PJSC «Motor-Sich» aircraft engines. It is intended to apply these engineering solutions in the new autogenerator flaw detector with functions of automatic adjustment for the level of sensitivity and its indication set by the specified procedure. 15 Ref., 2 Tabl., 13 Fig.

Keywords: eddy current nondestructive testing, autogenerator eddy current flaw detector, surface cracks, intermittent generation, dual-loop oscillatory circuit, oscillation regeneration

Надійшла до редакції 27.03.2022

ДОСЯГНЕННЯ ІЕЗ ім. Є.О. ПАТОНА НАН УКРАЇНИ В ГАЛУЗІ РЕНТГЕНОТЕЛЕВІЗІЙНОГО, 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 фокусуючої 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 (МОН).

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, а 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, а показано систему цифрової обробки зображень. Структурну схему програмного забезпечення системи цифрової обробки рентгенограм наведено на рис. 3, г.

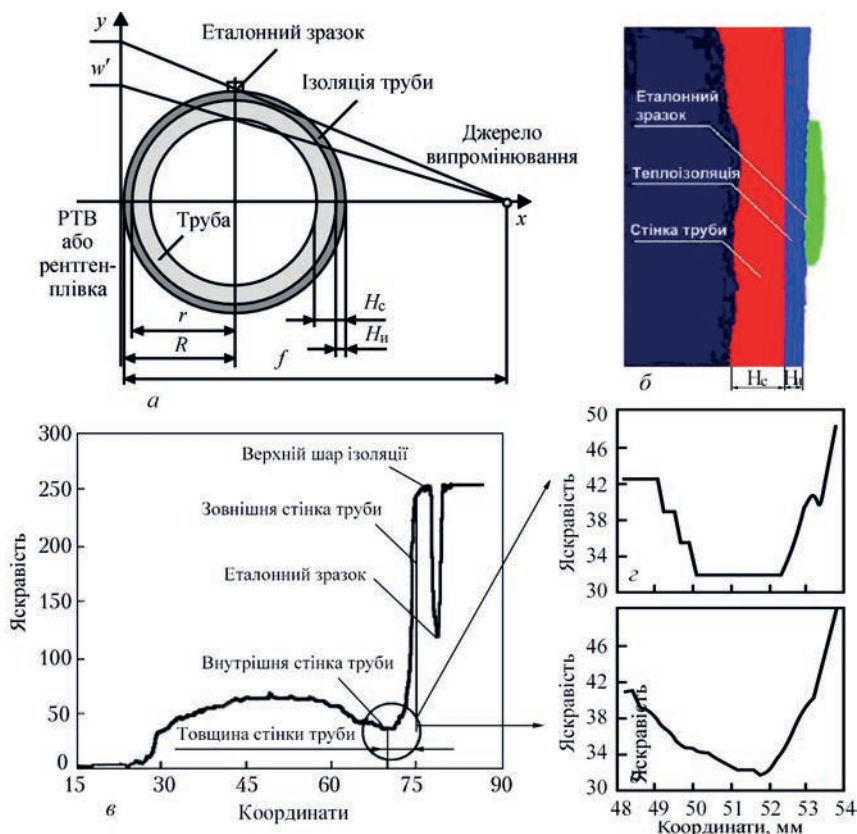


Рис. 2. Фрагменти технології тангенційного просвічування тіл обертання: а – схема тангенційного просвічування стінки труби; б – кольорова селекція радіаційного зображення стінки труби; в, г – поперечний розподіл яскравості початкового радіаційного зображення експериментального зразка (краї зображень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

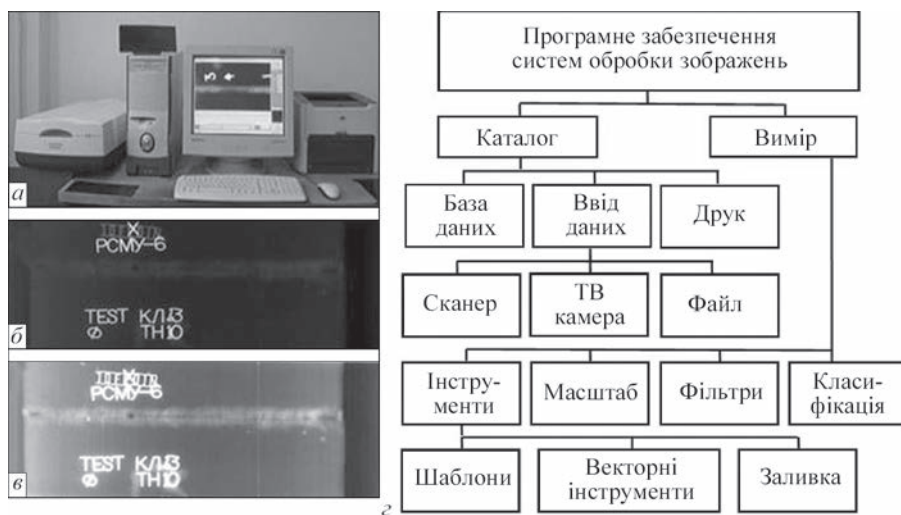


Рис. 3. Система цифрової обробки рентгенограм: а – робоче місце оператора, б – зображення вихідної рентгенограми зварного з'єднання, в – зображення рентгенограми зварного з'єднання після цифрового контрастування, г – структура програмного забезпечення

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 седелищ 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).

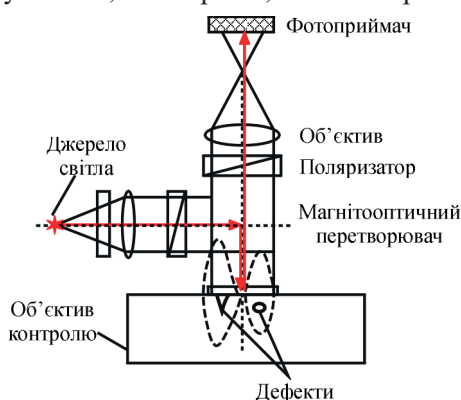


Рис. 4. Принципова схема МОВ

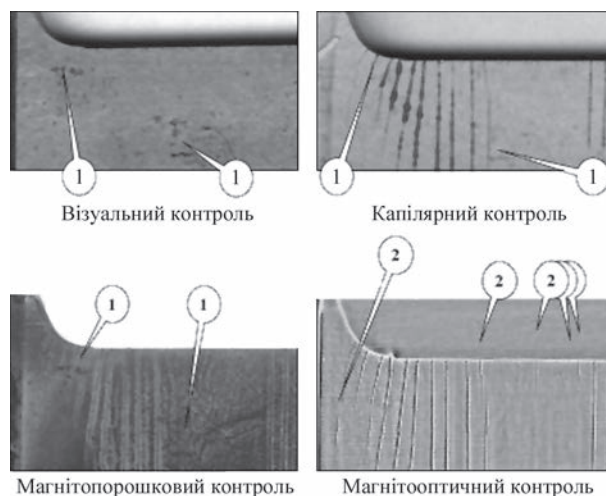


Рис. 5. Порівняльні результати методів контролю

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

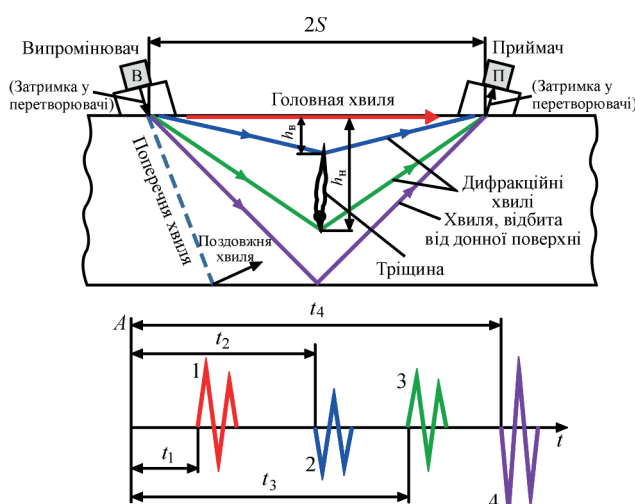


Рис. 8. Метод TOFD: 1 – сигнал головної хвилі; 2 – сигнал, викликаний дифракцією на верхній кромці тріщини; 3 – сигнал, викликаний дифракцією на нижній кромці тріщини; 4 – донний сигнал; t – затримка часу між випромінюванням і прийомом сигналів від відповідних УЗ-хвиль; h_b, h_t – відстань від поверхні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

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 металогравії, 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 металогравії 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 Х-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 плоскопанельні рентгенівські датчики дозволяють отримувати рентгенівські зображення безпосередньо при рентгеноскопії контролюємого об'єкта, які сумірні з форматом рентгенівської плівки (20...50 см). Широкий

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 мікровключення, 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
Виміряний 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.

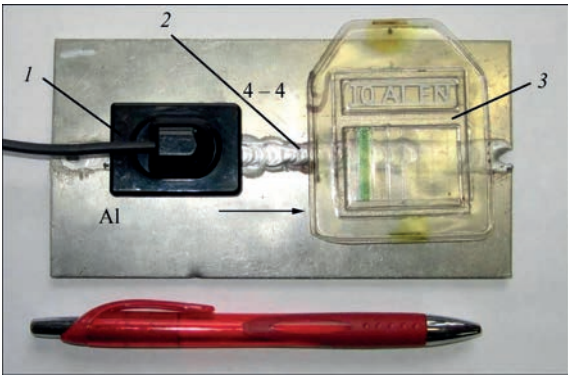


Рис. 9. Сенсор S10811-11 (1) на зварному з'єднанні (2) разом з дротовим еталон (3)

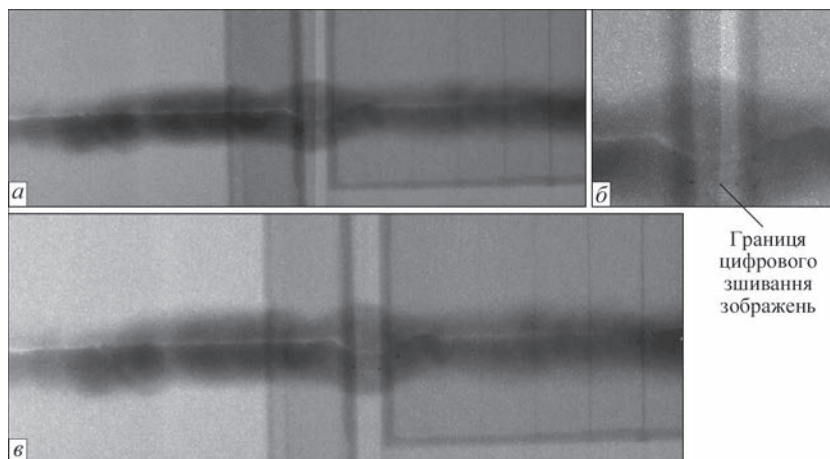


Рис. 10. Зшивання цифрових рентгенівських зображень

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

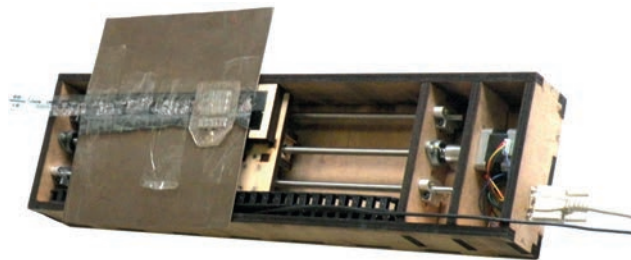


Рис. 11. Детектор рентгенотелевізійний скануючий на основі мініатюрного сенсора

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 сталевих листів (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

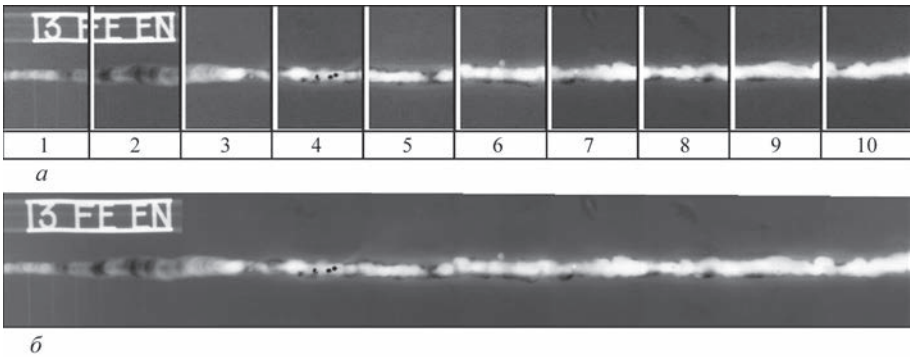


Рис. 13. Фрагменти рентгенограми зварного з’єднання: а – вихідні фрагменти рентгенівських зображень (24×34 мм), б – результати зшивання фрагментів зображень (повноформатне рентгенівське зображення, отримане з окремих фрагментів)

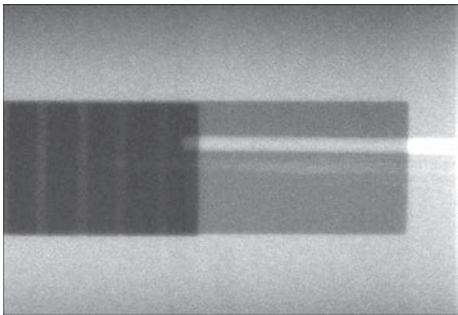


Рис. 14. Рентгенограма ділянки труби. Діаметр труби 48 мм, радіаційна товщина виробу 6 мм, чутливість 0,1 мм

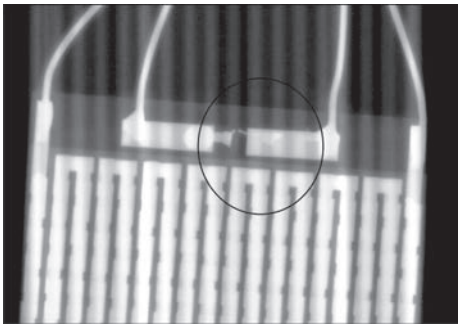


Рис. 15. Рентгенівське зображення нагрівального елемента на основі компонентів Пельтьє

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-

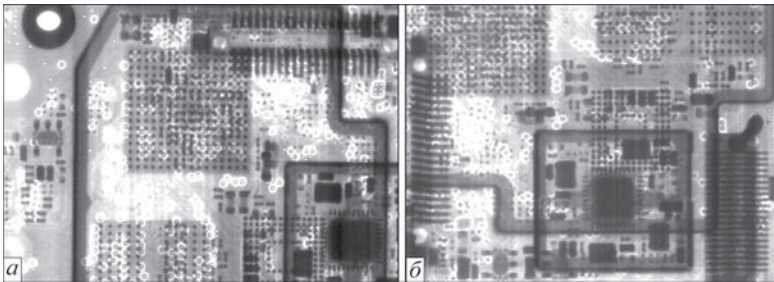


Рис. 16. Рентгенівські зображення різних ділянок друкованої плати телевізійної камери. У центрі темного квадрату розташована матриця відеосенсора

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*. 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. Троицкий 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. Троицкий В.О., Карманов М.М., Шалаев 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. Diagnost. i 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

ВИКОРИСТАННЯ СТАТИСТИЧНИХ МЕТОДІВ ДЛЯ ПІДТРИМКИ НЕОБХІДНОЇ ЯКОСТІ ЗВАРЮВАЛЬНОЇ ПРОДУКЦІЇ (Огляд)

Ю.К. Бондаренко, Ю.В. Логінова

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: seproz@ukr.net

Для отримання якісної продукції у зварювальному виробництві конструкцій із легких сплавів необхідно знати реальну точність наявного обладнання, визначати відповідність точності обраного технологічного процесу заданої точності виробу, оцінювати стабільність технологічного процесу. Вирішення завдань зазначеного типу проводиться в основному шляхом математичної обробки емпіричних даних, отриманих багаторазовими вимірами або дійсних розмірів виробів, або похибок обробки, або похибки вимірювання. Розглянуті сім нових інструментів контролю якості використовуються для аналізу чисельних даних, що відповідає вимогам TQM (Total Quality Management) – спиратися при прийнятті рішень на операційний аналіз, теорію оптимізації та статистику. Бібліогр. 13, рис. 14.

Ключові слова: ризики, неруйнівний контроль, зварні конструкції, зварні шви, персонал, умови виробництва, технологічна документація, система управління якістю

Вступ. Якість зварювальної продукції закладається у процесі наукових досліджень, конструкторських і технологічних розробок, забезпечується гарною організацією виробництва та, нарешті, підтримується у процесі експлуатації чи споживання. На всіх цих етапах важливо здійснювати своєчасний контроль і отримувати достовірну оцінку якості продукції. Сучасні виробники намагаються запобігти появі дефектів, ніж усувати їх у готовій продукції. Для того, щоби прийняти правильне рішення, тобто рішення, засноване на фактах, необхідно звернутися до статистичних інструментів, які дозволяють організувати процес пошуку фактів, а саме – статистичного матеріалу. Метод семи інструментів контролю якості застосовують як у виробництві, так і на різних стадіях життєвого циклу продукції. Метою методу є виявлення проблем, що підлягають першочерговому рішення, на основі контролю чинного процесу, збору, обробки та аналізу отриманого статистичного матеріалу для подальшого покращення якості процесу. Суть методу полягає в тому, що контроль якості – це одна з основних функцій в процесі управління якістю, а збір, обробка та аналіз фактів – найважливіший етап цього процесу. Науковою основою сучасного технічного контролю є математико-статистичні методи. Із безлічі статистичних методів для широкого застосування вибрано лише сім, які зрозумілі та можуть легко застосовуватися фахівцями різного профілю. Вони дозволяють вчасно виявляти та відображати проблеми, встановлювати основні фактори, з яких треба починати діяти, та розподіляти зусилля з метою ефективного вирішення цих проблем.

Впровадження семи методів має починатися з навчання цим методам всіх учасників процесу. Послідовність застосування методів може бути різною залежно від поставленої мети. Ці методи можна розглядати як окремі інструменти і як систему методів. Кожен метод може знаходити своє самостійне застосування залежно від того, до якого класу належить завдання. Сім основних інструментів контролю якості – набір інструментів, які дозволяють полегшити завдання контролю процесів, що протікають, і надати різного роду факти для аналізу, коригування та поліпшення якості процесів.

Мета роботи – аналіз значення статистичних методів в управлінні якістю в зварювальному виробництві, семи нових інструментів контролю якості та інших нових методів аналізу, вдосконалення якості шляхом покращення процесу виготовлення продукції або послуг у зварювальному виробництві конструкцій з легких сплавів із використанням неруйнівного контролю та технічної діагностики.

1. Значення статистичних методів в управлінні якістю у зварювальному виробництві. Статистичні методи відіграють важливу роль в об'єктивній оцінці кількісних і якісних характеристик процесу, є одним з найважливіших елементів системи забезпечення якості продукції та всього процесу управління якістю у зварювальному виробництві конструкцій з легких сплавів із застосуванням неруйнівного контролю та технічної діагностики.

Існують дві категорії похибок – систематичні та випадкові. У результаті безпосередніх спостережень, вимірювань або реєстрації фактів виходить безліч даних, які утворюють статистичну

сукупність і потребують обробки, що включає систематизацію та класифікацію, розрахунок параметрів, що характеризують цю сукупність, складання таблиць, графіків, які ілюструють процес [1]. На практиці використовують обмежену кількість числових показників, званих параметрами розподілу.

Сім найпростіших методів статистичного дослідження процесу. Сучасні статистичні методи є досить складними для сприйняття та широкого практичного використання без поглибленої математичної підготовки всіх учасників процесу. До 1979 р. Союз японських вчених та інженерів (UJSE) зібрав разом 7 досить простих у використанні наочних методів аналізу процесів. При всій своїй простоті вони зберігають зв'язок зі статистикою та дають професіоналам у зварювальному виробництві конструкцій з легких сплавів можливість користуватися їхніми результатами, а за необхідності – вдосконалювати їх [2].

Причинно-наслідкова діаграма Ісікави. Дана діаграма є дуже потужним інструментом для аналізу ситуації, отримання інформації про вплив різних факторів на основний процес у зварювальному виробництві. Тут з'являється можливість як виявити чинники, що впливають на процес, так і визначити пріоритетність їхнього впливу [3].

Діаграма типу 5М розглядає такі компоненти якості, як «люди», «обладнання», «матеріал, сировина», «технологія», «управління», а у діаграмі типу 6М до них додається компонент «середовище» (рис. 1).

Що стосується вирішуваної задачі кваліметричного аналізу, то:

– для компоненти «люди» необхідно визначити фактори, пов'язані зі зручністю та безпекою виконання операцій;

– для компоненти «обладнання» – взаємовідносини елементів конструкції виробу, що аналізується між собою, пов'язані з виконанням даної операції;

– для компоненти «технологія» – фактори, пов'язані з продуктивністю і точністю виконуваної операції;

– для компоненти «матеріал» – фактори, пов'язані з відсутністю змін властивостей матеріалів виробу у процесі виконання цієї операції;

– для компоненти «технологія» – фактори, пов'язані з достовірним розпізнаванням помилки процесу виконання операції;

– для компоненти «середовище» – фактори, пов'язані з впливом середовища на виріб та виробу на середовище.

Аналіз Парето. Аналіз Парето отримав свою назву на ім'я італійського економіста Вілфредо Парето (1848–1923 рр.), який показав, що більшість капіталу (80 %) перебуває в руках незначної кількості людей (20 %). Парето розробив логарифмічні математичні моделі, що описують цей неоднорідний розподіл, а математик М.О. Лоренц представив графічні ілюстрації, зокрема кумулятивну криву [4]. Правило Парето – універсальний принцип, який застосовується у безлічі ситуацій, і, без сумніву, – у вирішенні проблем якості у зварювальному виробництві конструкцій. Д. Джуран відзначив універсальне застосування принципу Парето до будь-якої групи причин, що викликають той чи інший наслідок, причому більша ча-

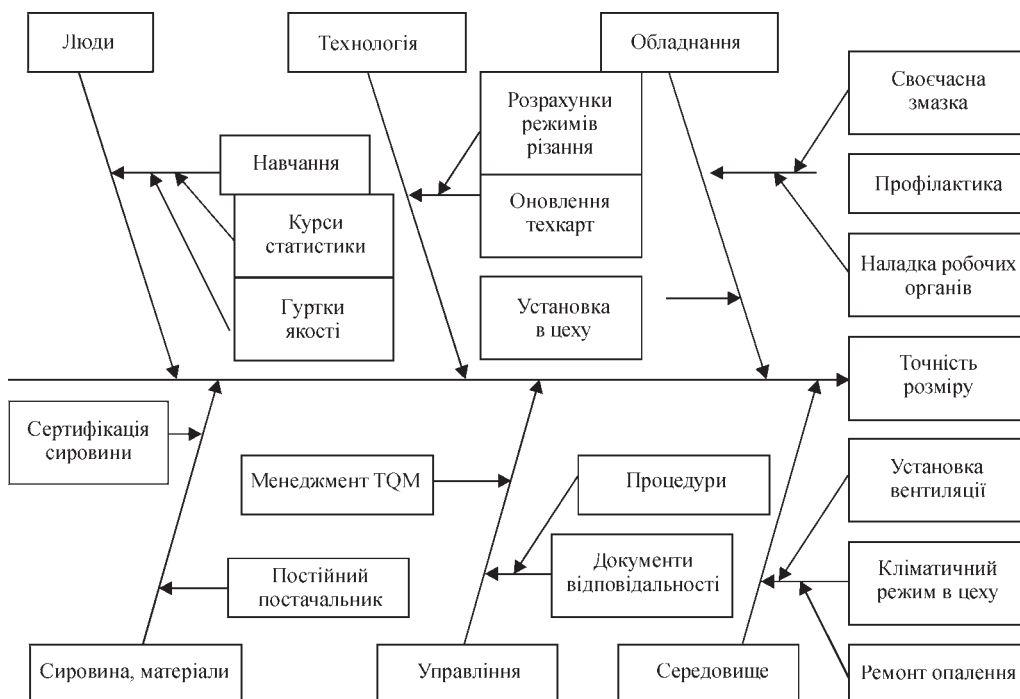


Рис. 1. Причинно-наслідкова діаграма Ісікави [3]

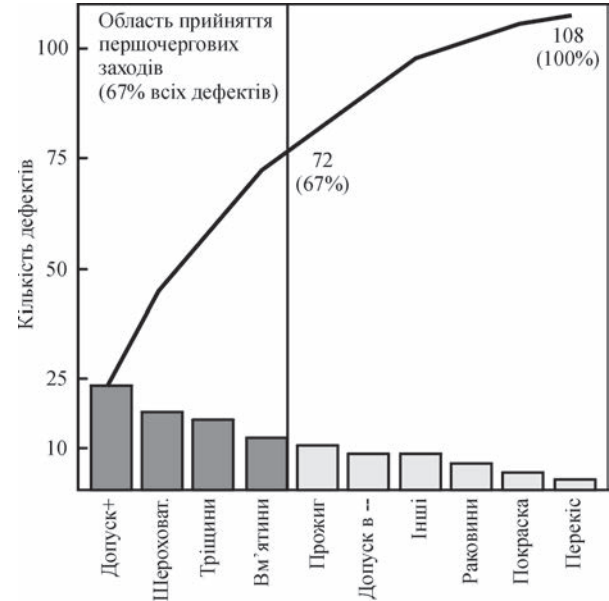


Рис. 2. Діаграма Парето [5]

стина наслідків викликана малою кількістю причин. Аналіз Парето ранжує окремі області за значимістю чи важливістю і закликає виявити та насамперед усунути ті причини, які викликають найбільшу кількість проблем (невідповідностей).

Аналіз Парето, як правило, ілюструється діаграмою Парето (рис. 2, табл. 1), на якій по осі абсцис показано причини виникнення проблем якості у порядку зменшення цих проблем, а по осі ординат – у кількісному вираженні самі проблеми, причому як у чисельному, так і в накопиченому (кумулятивному) відсотковому вираженні [5]. На діаграмі чітко видно область прийняття першочергових заходів, що окреслює причини, які викликають найбільше помилок. Таким чином, насамперед попереджувальні заходи мають бути спрямовані на вирішення саме цих проблем. Виявлення та усунення причин, які спричиняють появу найбільшої кількості дефектів, дозволяє нам, витрачаючи мінімальну кількість ресурсів (гроші, час, люди, матеріальне забезпечення), отримати максимальний ефект у вигляді значного зменшення кількості дефектів у зварювальному виробництві конструкцій.

Стратифікація. В основному, стратифікація – процес сортування даних згідно з деякими критеріями чи змінними, результати якого часто показуються у вигляді діаграм та графіків. Ми можемо класифікувати масив даних у різні групи (або категорії) із загальними характеристиками, які називаються змінною стратифікацією. Важливо вста-

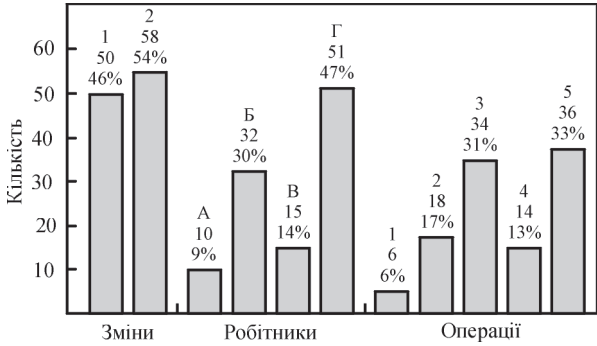


Рис. 3. Приклад аналізу джерела виникнення дефектів [6]

новити, які змінні використовуватимуться для сортування. Стратифікація є основою для інших інструментів, таких, як аналіз Парето або діаграми розсіювання. Таке поєднання інструментів робить їх потужнішими [6].

Візьмемо дані з контрольного листка (табл. 1). На рис. 3 наведено приклад аналізу джерела виникнення дефектів. Усі 108 дефектів (100 %) були класифіковані на 3 категорії – за змінами, робітниками та операціями. З аналізу представлених даних наочно видно, що найбільший внесок у наявність дефектів робить 2-а зміна (54 %) і робочий Г (47 %), який працює у цій зміні.

Гістограма – інструмент, який дозволяє візуально оцінити розподіл статистичних даних, згрупованих за частотою потрапляння у певний (заздалегідь заданий) інтервал. У класичному варіанті гістограма використовується для визначення проблем за допомогою аналізу форми розкидання значень, центрального значення, його близькості до номіналу, характеру розсіювання (рис. 4).

На рис. 4: *a* – все добре, середнє збігається з номіналом, варіабельність у межах допусків; *б* – слід змістити середнє для збігу з номіналом; *в* – слід зменшити розсіювання; *г* – слід змістити середнє та зменшити розсіювання; *д* – слід значно зменшити розсіювання; *е* – змішано дві партії, слід розбити на дві гістограми та проаналізувати їх; *ж* – аналогічно до попереднього пункту, тільки ситуація більш критична; *з* – необхідно зрозуміти причини такого розподілу, «обривистий» лівий край говорить про якісь дії щодо партій деталей; *і* – аналогічно до попереднього [7].

Діаграми розкиду. Діаграми розкиду являють собою графіки, які дозволяють виявити кореляцію (статистичну залежність) між різними факторами, що впливають на показники якості у зварювальному виробництві конструкцій. Діаграма будується по двох координатних осях, де по осі абсцис від-

Таблиця 1. Частка кожного виду дефектів у загальній кількості дефектів, які доводяться на один виріб [5]

Номер	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Кількість дефектів	23	18	17	14	9	7	7	6	4	3
Сума дефектів	23 (21 %)	41 (38 %)	58 (54 %)	72 (67 %)	81 (75 %)	88 (81 %)	95 (88 %)	101 (94 %)	105 (97 %)	108 (100 %)

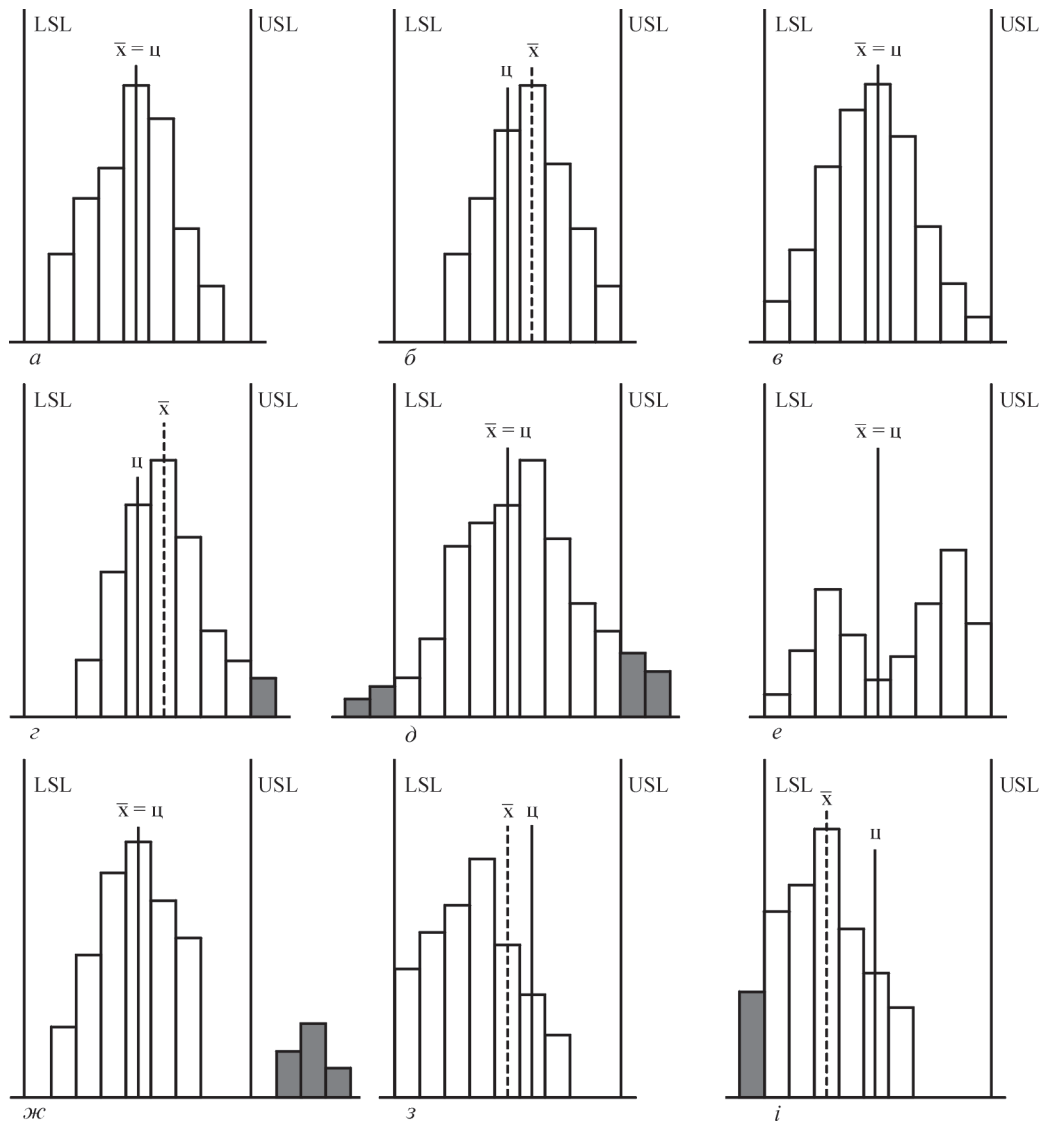


Рис. 4. Варіанти розташування гістограми стосовно технологічного допуску [7]: USL, LSL – верхня та нижня границя поля допуску, ц – цільове значення

кладається значення параметра, який змінюється, а по осі ординат – одержуване значення досліджуваного параметра, яке ми маємо у момент використання змінного параметра, і на перетині цих значень ставимо точку. Зібравши досить велику кількість таких точок, ми можемо робити аналіз і висновок. Наведемо приклад. На підприємстві у зварювальному виробництві конструкцій з легких сплавів із застосуванням неруйнівного контролю та технічної діагностики вирішили проводити заняття з основ менеджменту якості. Щомісяця навчання проходило певна кількість робітників. У січні навчання пройшли 2 особи, у лютому 3 особи тощо. Протягом року кількість кваліфікованих працівників зростала і до кінця року досягла 40 осіб. Керівництво дало доручення службі якості відстежити залежність відсотка бездефектної продукції, яка пред'являється з першого разу, кількості рекламцій, які надходять на завод, на продукцію з боку замовників, і витрати електроенергії у цеху від кількості навчених робітників.

Дані по місяцях було занесено в таблицю (табл. 2) і побудовано діаграми розкиду (рис. 5–7). У нашому випадку це пряма лінія. Кількість витраченої електроенергії не має залежності від кількості навчених працівників.

Контрольні карти. Контрольні карти – спеціальний вид діаграми, вперше запропонований В. Шухартом у 1924 р. Вони відображають характер зміни показника якості у часі, наприклад, стабільності отримання розміру виробу. По суті контрольні карти показують стабільність технологічного процесу, тобто знаходження середнього значення параметра в інтервалі значень, які допускаються, що складається з верхньої і нижньої межі допуску. Дані цих карт можуть сигналізувати про те, що параметр наближається до межі допуску і необхідно вже приймати запобіжні дії ще до того, як параметр вийде у зону браку. Тобто такий метод контролю дозволяє запобігти появі браку ще на стадії його зародження у зварювальному виробництві [9]. Існує сім основних типів карт:

Таблиця 2. Дані кількості навчених робітників, % бездефектності, кількості рекламаций, витрати енергії по місяцях [8]

Місяці	Кількість навчених робітників	% бездефектності	Кількість рекламаций	Витрата енергії, кВт
січень	2	77	124	146
лютий	5	74	136	138
березень	9	78	120	134
квітень	15	81	115	115
травень	22	85	110	136
червень	26	93	90	140
липень	28	95	82	137
серпень	28	96	63	129
вересень	29	98	59	141
жовтень	33	98	51	129
листопад	35	99	45	137
грудень	40	99	38	153

- 1. Відхилення середньоквадратичного відхилення середнього значення $x-S$.
- 2. Відхилення розмахів $x-R$.
- 3. Відхилення індивідуальних значень x .
- 4. Коливання числа дефектів.
- 5. Коливання числа дефектів на одиницю продукції u .
- 6. Коливання числа дефектних одиниць продукції pn .

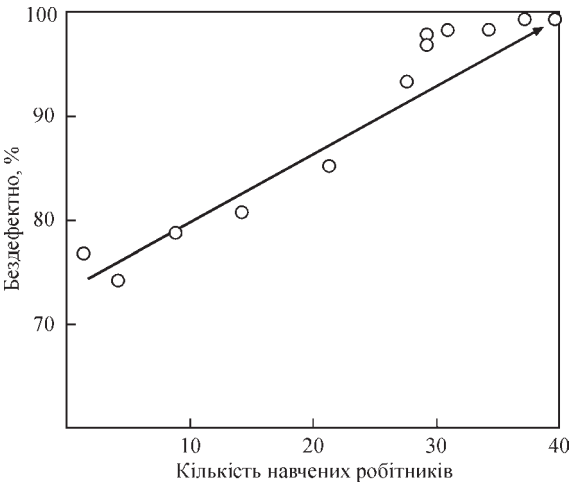


Рис. 5. Залежність відсотку бездефектності від кількості навчених робітників [8]

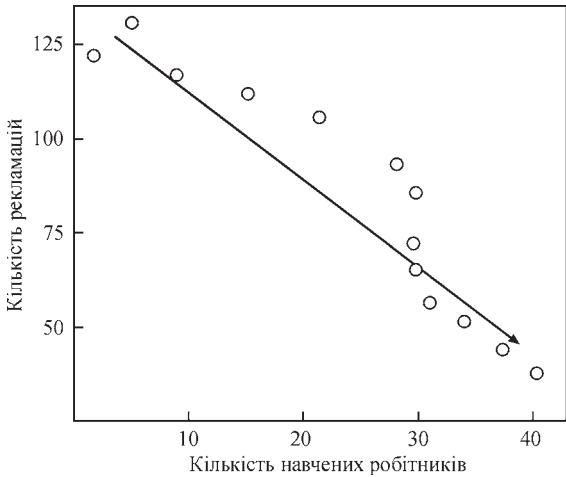


Рис. 6. Залежність кількості рекламаций від кількості навчених робітників [8]

- 7. Коливання частки дефектної продукції.
- Усі карти можна розбити на дві групи. Перша контролює кількісні параметри якості, які становлять безперервні випадкові величини – розміри, маса тощо. Друга – для контролю якісних альтернативних дискретних параметрів (є дефект – немає дефекту) (табл. 3, 4).

Наприклад, карта $x-S$. Коливання середнього арифметичного значення, коридор допуску є величиною $3S$ (для нормального розподілу) або tS (для розподілу Ст'юдента), де S – середньоквадратичне відхилення середнього. Середина коридору – середнє арифметичне значення першого виміру. Значення цієї карти найбільш достовірні та об'єктивні. Загальний вигляд контрольної карти показано рис. 8.

2. Сім нових інструментів контролю якості та інші нові методи аналізу у зварювальному виробництві. Ці інструменти контролю якості ви-

Таблиця 3. Основні типи контрольних карт [9]

Карти кількісні			Карти якісні			
			Число дефектів у вибірці		Число дефектних виробів	
$x-S$	$x-R$	x	C	u	pn	p
n велике	n мале	$n = 1$	n постійне	n різне	n постійне	n різне

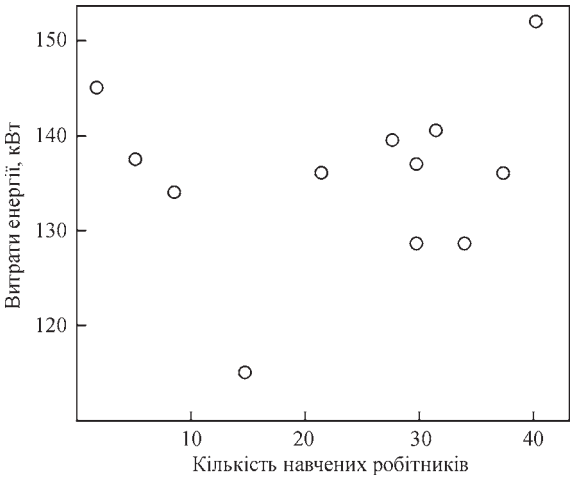


Рис. 7. Залежність кількості витраченої електроенергії від кількості навчених робітників [8]

Таблиця 4. Значення середнього параметра та верхньої і нижньої меж допуску [9]

Карта	Середнє	Верхня границя	Нижня границя
$x - S$	X_{cp}	$X_{cp} + tS$	$X_{cp} - tS$
$x - R$	R_{cp}	$D3 \cdot R_{cp}$	$D4 \cdot R_{cp}$
x	$X_{cp} R_{cp}$	$X_{cp} + 2,66 \cdot R_{cp}$	$X_{cp} - 2,66 \cdot R_{cp}$
C	C_{cp}	$C_{cp} + 3\sqrt{C_{cp}}$	$C_{cp} - 3\sqrt{C_{cp}}$
u	u_{cp}	$u_{cp} + 3\sqrt{\frac{u_{cp}}{n_{cp}}}$	$u_{cp} - 3\sqrt{\frac{u_{cp}}{n_{cp}}}$
pn	p_{cp}	$pn_{cp} + 3\sqrt{pn_{cp}(1 - p_{cp})}$	$pn_{cp} - 3\sqrt{pn_{cp}(1 - p_{cp})}$
p	p_{cp}	$pn_{cp} + 3\sqrt{\frac{p_{cp}}{n_{cp}}(1 - p_{cp})}$	$pn_{cp} - 3\sqrt{\frac{p_{cp}}{n_{cp}}(1 - p_{cp})}$

користовують для аналітичного вирішення проблем, тобто у ситуації, коли дані доступні, і щоби вирішити проблему, їх потрібно проаналізувати. Метою створення цих інструментів було отримання можливості застосування методів контролю якості всім персоналом виробництва на будь-якій ділянці роботи. Сім нових інструментів контролю якості (або сім інструментів управління процесом удосконалення) наступні:

- діаграма родинних зв'язків;
- діаграма взаємин;

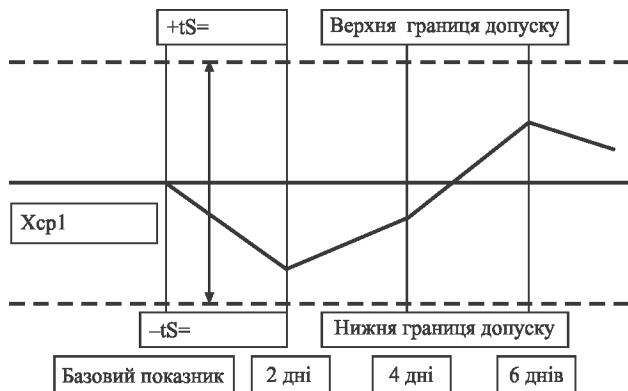


Рис. 8. Загальний вигляд контрольної карти [9]

- деревоподібна діаграма;
- лінійна діаграма;
- матрична діаграма;
- аналіз матричних даних;
- схема програми процесу вирішення.

Сім нових інструментів контролю якості відносяться до методів обробки головним чином словесних (описових) даних. Застосування цих інструментів є особливо ефективним, коли їх використовують як методи для найповнішої реалізації планів на основі системного підходу в умовах співпраці всього колективу підприємства. Ці інструменти були складено спільнотою UJSE [10]. Розглянемо зміст цих методів та можливості їх застосування у зварювальному виробництві конструкцій з легких сплавів.

Діаграма родинних зв'язків – це свого роду форма мозкового штурму. Діаграма використовується як засіб збору даних у результаті обговорення (ідеї, погляди, думки) та групування інформації за природними ознаками взаємин. Це – творчий інструмент (рис. 9).

Діаграма взаємовідношень – розкриває логічні зв'язки та послідовність проходження описуваних факторів. Вона призначена для виявлення логіч-

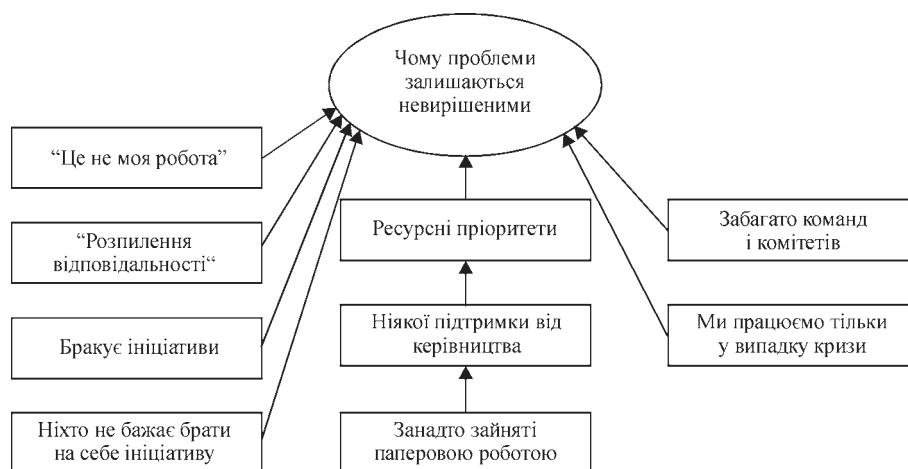


Рис. 9. Діаграма родинних зв'язків [11]



Рис. 10. Діаграма взаємовідношень [11]

них зв’язків між ідеями, згрупованими у діаграмі родинних зв’язків. Це – творчий інструмент, у якому є і логічні аспекти (рис. 10).

Деревоподібна діаграма – перешкоджає тенденції стрибкоподібного руху у вирішенні проблеми. Вона використовується для:

- відображення повного переліку видів діяльності, необхідних для досягнення бажаної мети;
- визначення факторів, пов’язаних із проблемою.

Будується у вигляді багатоступінчастої деревоподібної структури, елементами якої є засоби та способи розв’язання (рис. 11).

Лінійна діаграма (стрілоподібна діаграма, мережевий графік) – використовується на етапі складання оптимальних планів тих чи інших заходів після того, як:

- визначено проблеми, які потребують вирішення;
- намічено необхідні заходи;
- визначено терміни та намічено хід здійснення запланованих заходів.

За допомогою цього інструменту можна провести аналіз операцій, що повторюються, для підвищення їх ефективності.

Матрична діаграма – призначенням цього інструменту є продемонструвати взаємовідносини між завданнями, функціями і характеристиками та оцінити їхню відносну значимість. Ця діаграма є ключовим моментом «Будинку якості». На прикладі оцінюється діяльність компанії «Х» порівняно з двома конкурентами (табл. 5).

Аналіз матричних даних. Це єдиний з семи інструментів управління, який призначений для аналізу числових даних. Він потребує статистичних відомостей і наочно подає дані матричної діаграми [11].

Схема програми процесу розв’язання. Дана схема застосовується для опису кожної події та непередбачених обставин, які можуть виникнути на шляху проходження від констатації проблеми до її вирішення (рис. 12).

Методи забезпечення високої якості технічного обслуговування (ТО) у кожній організації з технічного обслуговування (ОТО) застосовуються свої, але, незалежно від статусу, відомчої підпорядкованості та форми власності підприємства, у кожному з них створюється система управління і забезпечення якості ТО (скорочено «Система управління якістю» – СУЯ ТО). Вона являє собою

Таблиця 5. Результат дослідження думки споживачів [10] (показники виведені за десятибальною системою)

Вимоги споживача	Конкурент 1	Конкурент 2	Компанія «Х»
Гнучкі терміни постачання	7	6	3
Продукція без дефектів	8	5	3
Ефективна система роботи з рекламациями	9	6	2

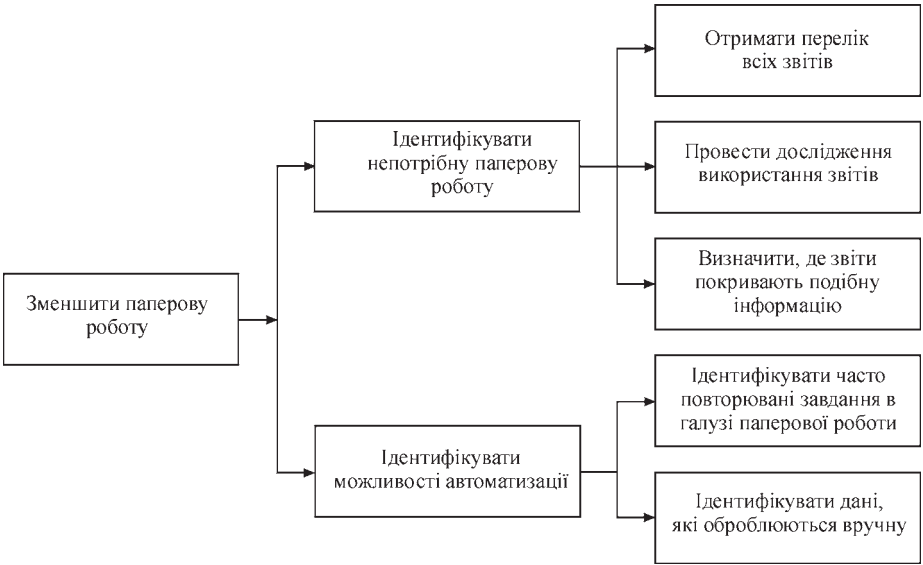


Рис. 11. Деревоподібна діаграма [11]

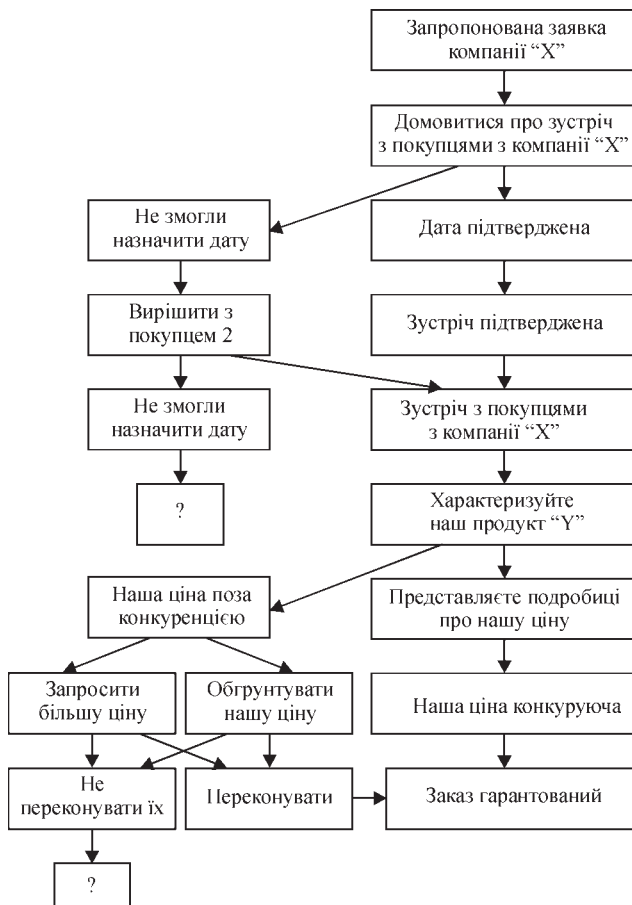


Рис. 12. Схема програми процесу вирішення, який описує, як забезпечити вигравш замовлення [12]

сукупність організаційної та виробничої структури організації з ТО, де розподілені повноваження і відповідальність щодо забезпечення потрібного рівня якості ТО, а також процесів і ресурсів, необхідних для здійснення політики організації у галузі якості технічного обслуговування, наприклад, авіаційної техніки (ТО АТ). Перелік і послідовність виконання робіт щодо створення, впровадження та функціонування СУЯ організації з ТО АТ є аналогічними тим, які застосовуються в авіакомпаніях та аеропортах. Організації з технічного обслуговування необхідно визначити бізнес-процеси та розробити їх організаційно-технологічні схеми (блок-схеми, карти). Розробка організаційно-технологічних схем супроводжується аналізом існуючої системи управління та внесенням, у разі необхідності, змін у виробничий процес і в організаційну структуру відповідно до вимог ISO 9001:2015. Приклад карти процесу СУЯ «Виконувати роботи з ТОіР АТ» наведено на рис. 13.

СУЯ ОТО охоплює всі стадії виробничого процесу ТО: матеріально-технічне забезпечення, розробку виробничих процесів; виконання всіх технологічних операцій; контроль стану АТ і якості її ТО; метрологічне забезпечення; забезпечення та аналіз надійності АТ; здавання АТ у ремонт і приймання її від ремонтних підприємств; освоєння нової техніки; розміщення, зберігання, транспортування та охорону АТ.

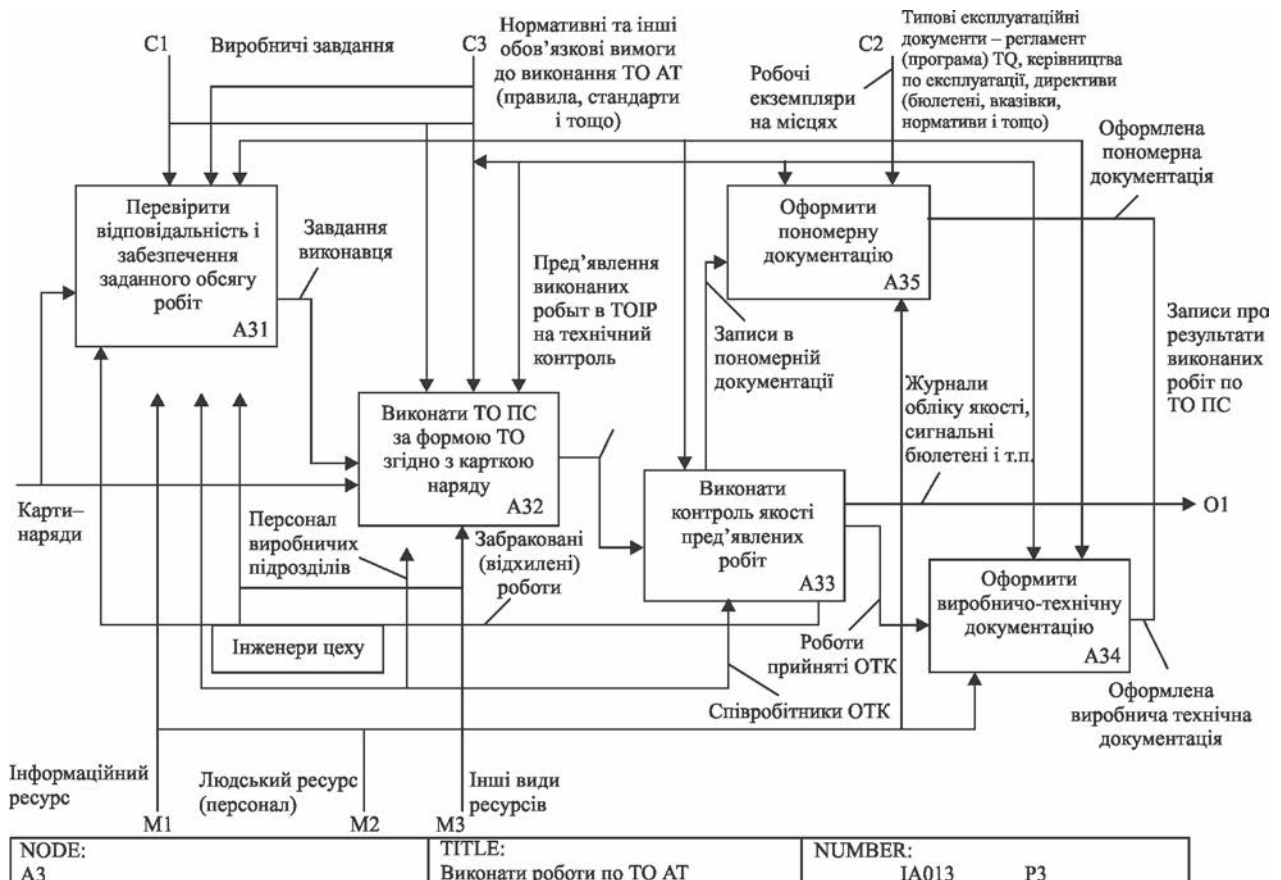


Рис. 13. Карта процесу СУЯ «Виконувати роботи з ТОіР АТ» [13]

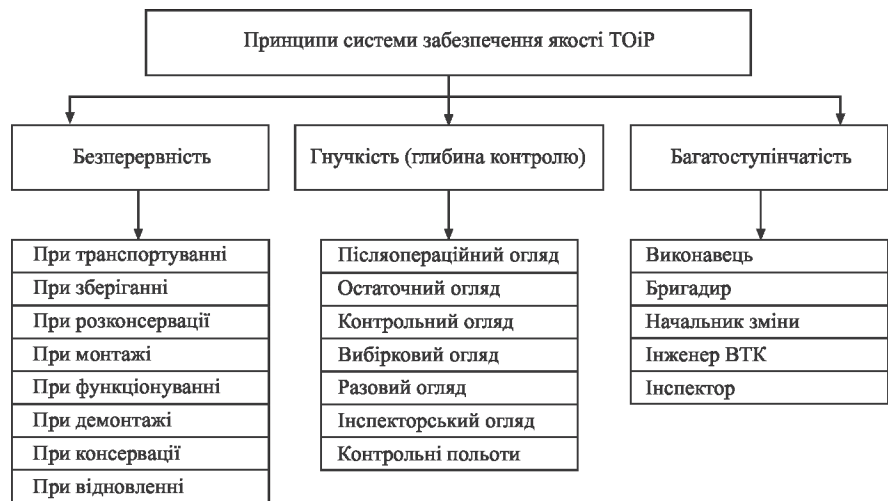


Рис. 14. Принципи системи забезпечення якості ТОiP [13]

Основні принципи забезпечення якості показано на рис. 14. Загальне керівництво СУЯ ТО здійснює начальник ОТО, який визначає політику у галузі якості ТО АТ і забезпечує її погодженість з іншими напрямками діяльності авіапідприємства; розподіляє фінансові, матеріальні та інші ресурси підприємства; визначає відповідальність і повноваження підрозділів організації і службових осіб у галузі якості АТ; особисто бере участь у періодичних перевірках якості ТО в усіх підрозділах організації.

Заступником начальника з якості є начальник ВТК. У деяких ОТО може бути організовано службу управління якістю, до складу якої входять і ВТК. У цьому випадку заступником начальника з якості є директор управління якістю. Заступник начальника з якості забезпечує загальне керівництво з якості ТО; збір, узагальнення та аналіз інформації про якість ТО АТ; розробку заходів з підвищення якості; розробку коригувальних впливів при появі відхилень від заданих норм і контроль за їх виконанням; підготовку СУЯ ТО до сертифікації в організації з ТО. При цьому він організує і контролює доведення політики організації у галузі якості ТО до кожного робітника; розробку, впровадження і контроль за функціонуванням СУЯ ТО, що забезпечує реалізацію політики з якості; перевірку, аналіз ефективності СУЯ та її удосконалення; діяльність підрозділів організації у галузі якості ТО АТ; рекламаційно-претензійну роботу та здійснення взаємозв'язку з постачальниками з питань стабільного забезпечення якісним обладнанням і авіаційно-технічним майном; роботу з аналізу витрат та економіки якості ТО АТ.

Виняткове право скасовувати рішення заступника начальника з якості надається тільки начальнику організації. Заступник начальника з якості є членом Ради з безпеки польотів і має право контролювати якість матеріалів і роботи підрозділів підприємства, що не входять у структуру організації з ТО, якщо ці роботи впливають на якість ТО АТ і БзП, а також надавати пропозиції керівництву з питань якості ТО.

зації з ТО, якщо ці роботи впливають на якість ТО АТ і БзП, а також надавати пропозиції керівництву з питань якості ТО.

Висновки

1. Існує сім інструментів управління якістю.
2. Діаграма зв'язку виділяє центральну проблему і визначає її зв'язки з факторами, які на неї впливають.
3. Деревоподібна діаграма розбиває завдання на базові елементи та показує логіку і послідовність зв'язків між ними.
4. Матриця пріоритетів або матричний аналіз даних перегрупує інформацію, представлену в матричній діаграмі, таким чином, щоби підкреслити силу кореляційного зв'язку між змінними.
5. Діаграма процесу виконання програми показує події та можливі варіанти на шляху від постановки задачі до її вирішення.
6. Розгортання функції якості поєднує у собі матричні діаграми і матричний аналіз. Діаграма, яка при цьому отримується, називається «Будинком якості» або розгортанням «Функції Якості».

Список літератури

1. Аскаров Е.С. (2007) *Управление качеством. Учебное пособие*. Изд-во 2. Алматы, Pro service.
2. Имаи М. Кайдзен (2004) *Ключ к успеху японских компаний*. Москва, Альпина Бизнес Букс.
3. Пономарев С.В., Мищенко В.Я. (2005) *Управление качеством продукции. Инструменты и методы менеджмента качества*. Москва, РИА «Стандарты и качество».
4. Уилер Д., Чамберс Д. (2021) *Статистическое управление процессами*. Москва, Альпина Паблишер.
5. ДСТУ ISO 9001:2015 *Системы управления качеством. Требования* (ISO 9001:2015, IDT).
6. Глудкин О.П., Горбунов Н.М., Гуров А.И., Зорин Ю.В. (1999) *Всёобщее Управление качеством: Учебник для вузов*. Глудкин О.П. (ред.). Москва, Радио и связь.
7. (2000) *Управление качеством: Т.2. Принципы и методы всеобщего руководства качеством. Основы обеспечения качества*. Под общей редакцией Азарова В.Н. Москва, МГИЭМ (ISBN 5-8125-0085-1).
8. Ван дер Вейк Г. (1999) *Бенчмаркинг. Управление наукой в странах УС*. Т.3. Москва, Наука.

9. Потап'євський А.Г., Бондаренко Ю.К., Логінова Ю.В., Артюх К.О. (2019) Аналіз ризиків на технічну безпеку джерел живлення та зварних конструкцій з використанням НК і ТД для виробництва. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, 4, 58–66. DOI: <https://doi.org/10.15407/tdnk2019.04.07>
10. Бондаренко Ю.К., Ковальчук О.В., Логінова Ю.В. (2020) Дослідження впливу джерел ризиків на технічну безпеку зварних конструкцій при експлуатації при впровадженні стандарту ДСТУ ISO 9001:2015. *20-та Міжнародна науково-практична конференція з діючими семінарами «Якість, стандартизація, контроль: теорія і практика» (КСК-20), м. Одеса, 2020 р.*
11. Бондаренко Ю.К., Логінова Ю.В. (2022) Вдосконалення якості шляхом покращення процесу виготовлення продукції або послуг в зварювальному виробництві конструкцій з легких сплавів. *Сварщик*, 1, 34–45.
12. Бондаренко Ю.К., Ковальчук О.В., Логінова Ю.В. (2020) Исследование влияния источников рисков на техническую безопасность сварных конструкций при эксплуатации и внедрении стандарта ДСТУ ISO 9001:2015. *Там же*, 5, 41–48.
13. Радько О.В., Мельник В.Б. (2020) *Процеси та системи управління якістю в авіації. Навч. посібник*. Київ, НАУ.
5. DSTU ISO 9001:2015 *Quality management systems. Requirements* (ISO 9001:2015, IDT) [in Russian].
6. Gludkin, O.P., Gorbunov, N.M., Gurov, A.I., Zorin, Yu.V. (1999) *Total quality management: Manual for higher education inst.* Ed. by O.P. Gludkin. Moscow, Radio i Svyaz [in Russian].
7. (2000) *Quality management. Vol. 2: Principles and methods of total quality management. Fundamentals of quality assurance*. Ed. by V.N. Azarov. Moscow, MGIEP (ISBN 5-8125-0085-1).
8. Van der Veik, G. (1999) *Benchmarking. Science management in EU countries*. Vol. 3. Moscow, Nauka.
9. Potapievskiy, A.G., Bondarenko, Yu.K., Loginova, Yu.V., Artyukh, K.O. (2019) Analysis of risks for technical safety of power sources and welded structures with application of NDT&TD for production. *Tekh. Diagnost. ta Neruiniv. Kontrol*, 4, 58–65 [in Ukrainian]. DOI:<https://doi.org/10.15407/tdnk2019.04.07>
10. Bondarenko, Yu.K., Kovalchuk, O.V., Loginova, Yu.V. (2020) Investigation of the impact of risk sources on the technical safety of welded structures during operation in the implementation of the standard DSTU ISO 9001: 2015. *In: Proc. of 20th Int. Sci.-Pract. Conf. on Quality, Standardization, Control: Theory and Practice (Odessa, Ukraine, 2020)* [in Ukrainian].
11. Bondarenko, Yu.K., Loginova, Yu.V. (2022) Improvement of quality by means of optimization of manufacturing process of products or services in welding production of light alloy structures. *Svarshchik*, 1, 34–45 [in Ukrainian].
12. Bondarenko, Yu.K., Kovalchuk, O.V., Loginova, Yu.V. (2020) Investigation of the impact of risk sources on the technical safety of welded structures during operation in the implementation of the standard DSTU ISO 9001: 2015. *Ibid*, 5, 41–48 [in Russian].
13. Radko, O.V., Melnik, V.B. (2020) *Processes and quality management systems in aviation: Manual*. Kyiv, NAU [in Ukrainian].

References

USE OF STATISTICAL METHODS TO SUPPORT THE REQUIRED QUALITY OF WELDED PRODUCTS (Review)

Yu.K. Bondarenko, Yu.V. Loginova

E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU, 11 Kazymyr Malevych str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: seproz@ukr.net

To obtain quality products in welding industry of light alloy structures, it is necessary to know the real accuracy of the existing equipment, determine the correspondence of the selected technological process to the specified accuracy of the product, and assess the stability of the technological process. The mentioned type of problems is solved, mainly, by mathematical processing of empirical data, obtained by multiple measurements or actual product dimensions, or processing errors, or measurement error. The considered seven new quality control tools are used for analysis of numerical data that corresponds to the requirements of TQM (Total Quality Management) – to rely on operational analysis, optimization theory and statistics, when making decisions. 13 Ref., 17 Fig.

Keywords: risks, nondestructive testing, welded structures, welds, personnel, manufacturer's terms, technological documentation, quality control system

Надійшла до редакції 18.03.2022 р.

НОВА КНИГА



Недосєка А.А., Недосєка С.А.

Основы расчета и диагностики сварных конструкций. Глава 7. Більш складні питання теорії – К.: Видавництво «ІНДПРОМ», 2021. – 94 с., 62 рис., 3 табл.

Сьома глава підводить підсумок досліджень авторів в області застосування АЕ технології при оцінці стану конструкцій. У ній сформульовано і зосереджено основні наукові гіпотези та досягнення авторів. Наведені матеріали є складнішими в освоєнні і при використанні в розрахунках і практиці контролю потребують підвищеної уваги. Останній параграф глави присвячено прикладу практичного використання розробленої методики при діагностуванні двох великогабаритних посудин, що показав цілком задовільні результати.

Книга призначена для студентів, аспірантів і викладачів машинобудівних спеціальностей вузів, для спеціалістів, які проходять перепідготовку на курсах підвищення кваліфікації за напрямом «Технічна діагностика», а також для інженерів підприємств і організацій, які працюють у галузі контролю та діагностики конструкцій.

ISBN 966-95315-1-4

THE MYSTERIES OF THE SHROUD OF TURIN

ТАЄМНИЦІ ТУРИНСЬКОЇ ПЛАЩАНИЦІ

by Robert A. Rucker

In 1931, a professional photographer named Giuseppe Enri pointed his camera at a piece of cloth called the Shroud of Turin and took the picture shown on the right. How was this image formed? When was it made? Who made it? Is this an image of a real person? Could this be an image of the man known as Jesus Christ? Could this be the authentic burial cloth of Jesus? These are just a few of the questions that arise.

У 1931 р. професійний фотограф Джузеппе Енрі направив камеру на шматок тканини під назвою «Туринська плащаниця» і зробив знімок. Як формувався цей образ? Коли це було зроблено? Хто це зробив? Це образ реальної людини? Чи може це бути зображення людини, відомої як Ісус Христос? Чи може це бути справжня поховальна тканина Ісуса? Це лише деякі з питань.



Shroud of Turin is one of the most mysterious and potentially significant items in human possession. It has been featured on the cover of US News and World Report (1 March 2002) and Time magazine (20 April 1998). The June 1980 edition of National Geographic included a 24-page article with a four-page foldout of the Shroud. In the 1980s, the Shroud was briefly headline news around the world, but for reasons that will be discussed later in this article, the Shroud has received little media attention for the last three decades. That is now starting to change due to four recent papers on statistical analysis published in peer-reviewed journals.

This article provides an overview of the Shroud, including its images, history, materials, and previous testing. It also includes the author's hypothesis to explain the main mysteries of the Shroud, including image formation, carbon dating, and features of the blood on the Shroud. The purpose of this article is to encourage the development of a program for future testing of the Shroud. There are rumors the Shroud may go on exhibition in Turin, Italy, in 2025.

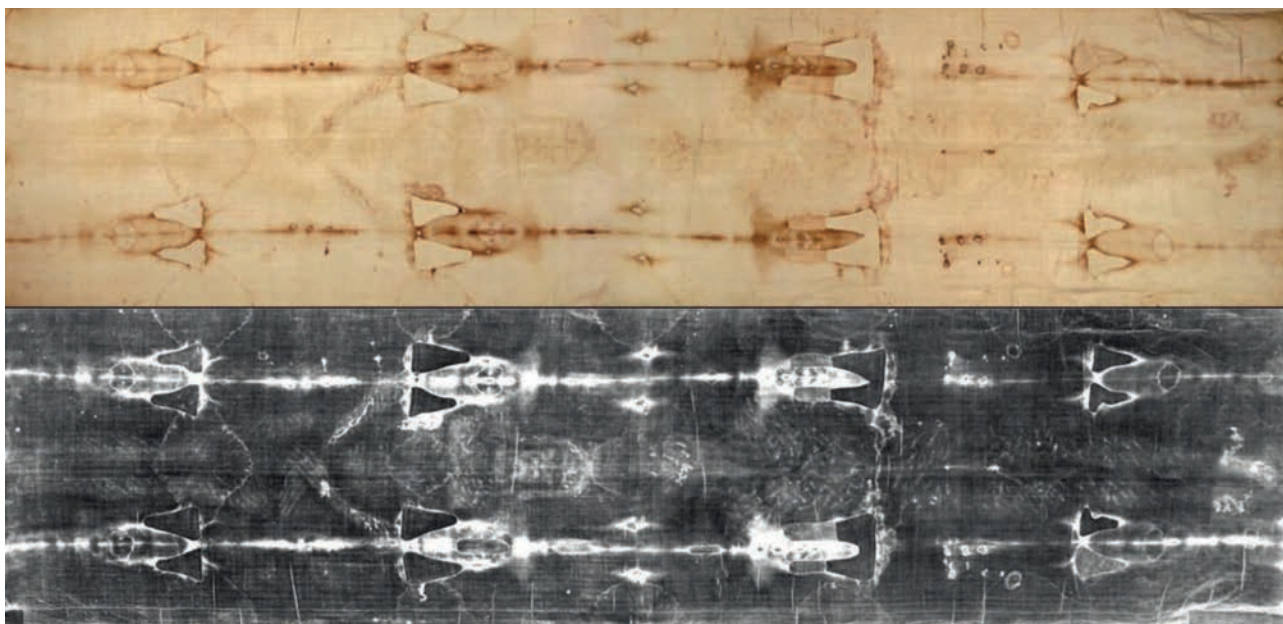


Figure 1. The Shroud of Turin, as seen (top; negative images) and the camera negative (bottom; positive images)

Рис. 1. Туринська плащаниця, натуральний вигляд (зверху, зображення у негативі) і зйомка камерою (знизу, зображення у позитиві)

To help obtain authorization for further scientific testing possibly following the exhibition in 2025, a comprehensive testing program should be developed for the Shroud to take advantage of advances in technology since the last extensive testing in 1978.

What Is the Shroud of Turin?

A shroud is a piece of cloth in which a person is buried. Turin, also called Torino, is a city in northwestern Italy. Thus, the Shroud of Turin refers to a particular burial cloth that has been in Turin, Italy, since 1578. The Shroud is a linen cloth about 14 ft 4 in. long by 3 ft 8 in. wide (437 x 111 cm). It is about as thick as a T-shirt (about 0.35 mm) and is very pliable. Many people regard this cloth to be a holy relic because ancient tradition has long claimed it to be the authentic burial cloth of Jesus Christ. This claim is supported by the full-size front and dorsal (back) images of a man who was crucified exactly as Jesus was crucified according to the Gospels in the New Testament, yet extensive testing in 1978 indicated these images are not due to pigment, scorch, liquid, or photography.

What Do the Images Show?

In Figure 1, the top image shows the Shroud as it would normally be seen. It shows two long scorch marks caused by a fire in 1532 when it was in Chambery, France. Also shown are water stains resulting from water thrown onto the box containing the Shroud after the fire and 16 patches used to repair one burned corner of the Shroud, as it was folded in the box. The images of the crucified man can be seen between the scorch marks. The front image is on the left with head, arms, torso, and legs visible. The back (or dorsal) image is on the right, with the head toward the left and the feet on the right.

The bottom image in Figure 1 is the photographic negative of the Shroud, but it shows the body as a positive image. This means the images on the Shroud are negative images, with light and dark areas reversed. It is important to note there are no images of the sides of the body or the top of the head, and the front and dorsal images are head-to-head.

Vertical views of the images are shown in Figure 2. The front image shows puncture wounds in the scalp as would occur from a cap (crown) of thorns. It shows a swollen cheek, bent nose, and a 2 in. (5 cm) elliptical wound in the side the size of a Roman thrusting spear, with blood running down from it separated into red and clear components. The clear components contain blood plasma and clear watery fluid from the pleural cavity. This indicates the side wound is a postmortem (after death) wound.

The front image shows a nail wound through the wrist, contrary to paintings in the Middle Ages depicting crucifixion, which had the nails going through the palm. We now know a nail through the

palm would not support sufficient weight because it would have no bones above it. The image does not show the thumbs, also contrary to paintings of the Middle Ages. When the nail was forced through the wrist at that location, it would have crushed the nerve that passes through that location. All the nerves from the fingers and the thumb connect into this nerve, so that crushing it would have forced the thumb to collapse into the palm. Thus, in both respects (location of the nail wound and no thumbs visible), the image indicates it was not made in the Middle Ages, contrary to the 1260-1390 AD carbon dating of the Shroud.

The front image also shows blood that ran down the arms from the wrist wounds, with two angles of the blood flow consistent with a man pushing up and down on the cross to breathe. About 120 scourge marks are visible as well as abrasions on the nose and one knee, suggesting the man had one or more falls. There is also a 3.2 in. (8.1 cm) wide side strip sewn onto the main Shroud using a unique professional stitch most similar to a stitch on a cloth from Masada, which was destroyed in 73-74 AD. This indicates the Shroud is probably from the first century.

The dorsal image in Figure 2 shows puncture wounds in the scalp and abrasions on the shoulders consistent with carrying a rough heavy object. Scourge marks are visible down the body consistent with two Roman flagra (scourge whip) containing dumbbell-shaped weights on the ends of three straps, along with a flow of blood and clear blood serum and clear watery fluid from the pleural cavity that drained from the side wound and ran across the small of the man's back. Also, two nails were evidently placed through one foot with only one of the nails

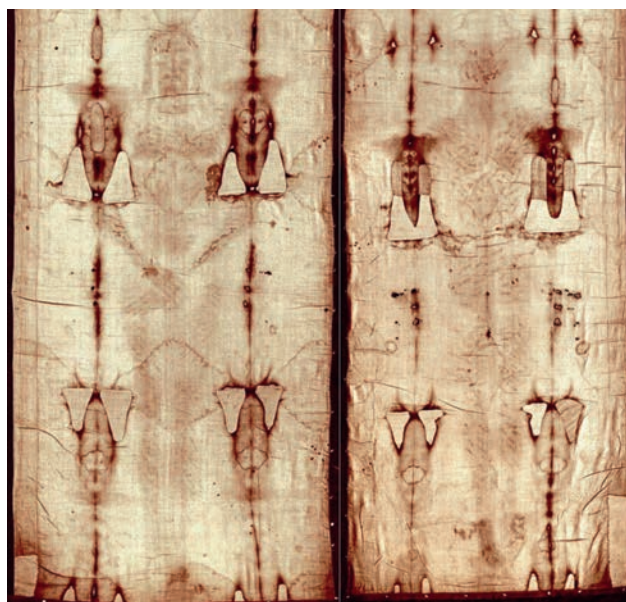


Figure 2. Front (left) and dorsal (right) images on the Shroud (shown as negative images).

Рис. 2. Зображення Плащаниці спереду (ліворуч) та ззаду (праворуч) (показано як зображення у негативі)

through the other foot. This would permit one foot to be rotated to allow the man to push up and down to breathe while crucified. The shape of the feet, being twisted together, indicates the presence of rigor mortis. This indicates the man was dead on the cross long enough for rigor mortis to set in.

There are several unusual or unique features to the images on the Shroud. The images are negative on the cloth with light and dark areas reversed. They have no outline or brush strokes, and they contain 3D information (Jackson et al. 1984), which allows a 3D statue to be reconstructed from the 2D Shroud. No painting or photograph contains 3D information. Also, the Shroud contains no products of body decay. The front and dorsal images are head-to-head because the cloth was wrapped up the back of the body, over the head, and then down the front of the body.



Figure 3. The Shroud has been housed in the Cathedral of St. John the Baptist in Turin, Italy, since 1694, and in the city of Turin since 1578. Рис. 3. З 1694 р. Плащаниця зберігається в соборі Святого Івана Хрестителя в Турині (Італія), а у м. Турин – з 1578 р.

A closer view of the face is shown on the opening photo in a positive image. This image contains an exact front view with a long nose, mustache, beard, and hair parted in the middle coming down on both sides of the head, with the hair a little longer on one side than the other. This image appeared in paintings starting about 550 AD and was on coins starting about 692 AD. Thus, this image long predates the carbon dating of the Shroud (1260-1390 AD) and is the source of our concept of Jesus's appearance.

History of the Shroud

The Shroud was brought into Turin, Italy, in 1578 and has been kept in the Cathedral of St. John the Baptist in Turin since 1694. Figure 3 shows a photo of the cathedral taken in 1978 when the Shroud was on exhibition in the cathedral. The Shroud goes on exhibition only a few times a century and when it does, millions of people slowly file past it to see the front and back images of the crucified man.

Figure 4 shows the route most Shroud researchers believe the Shroud has taken. Based on evidence of

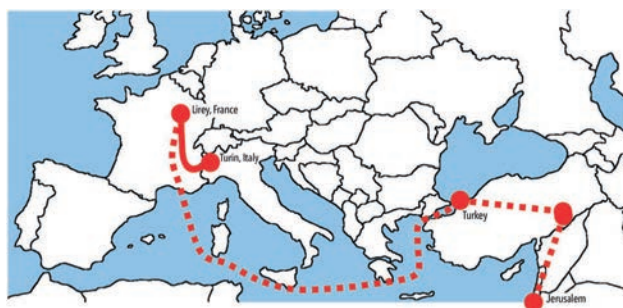


Figure 4. Historical movement of the Shroud.

Рис. 4. Історичне переміщення Плащаниці.

pollen from the Jerusalem area and chips of Jerusalem limestone on the Shroud, it is generally believed the Shroud started in Jerusalem but must have been evacuated before the city was destroyed in 70 AD. The Shroud may have been taken to Antioch on the coast along with other relics. It may have been used for evangelistic purposes in Galatia in central Turkey, according to Galatians 3:1. It was probably taken to Edessa (Urfa), Turkey, before being taken to Constantinople either in 574 AD as the «Image of God Incarnate» or in 944 AD as the «Image of Edessa» or Mandylion. The Shroud was in Constantinople at least up to 1204 AD when the fourth crusade sacked the city. Some believe it briefly went to Athens before being taken to Lirey, France, where it was exhibited as the burial cloth of Jesus in about 1355 or 1356.

Figure 4 shows a continuous line from Lirey, France, to Turin, Italy, because there is continual historical documentation for this route. Figure 4 shows a dashed line from Jerusalem to Lirey because the routes are not known. There are significant problems in knowing certain aspects of the Shroud's location prior to its presence in Lirey because it has only been called the Shroud of Turin since it came into Turin. Its previous names often create uncertainties in the historical records.

Materials of the Shroud

The Shroud is woven from linen thread made from the stems of the flax plant. Flax stems have a hollow space at the center surrounded by a woody body that is encircled by bundles of flax fibers. These flax fibers extend the length of the long stems. In making linen thread, these flax fibers are separated from the rest of the stem by allowing the stems to rot in water. This process is called retting. The diameter of these fibers is about 15 to 20 μm , which is about a fifth of the diameter of a human hair. A typical linen thread contains about 100 of these fibers.

Under a microscope, a flax fiber looks like bamboo with nodes along the length. This characteristic makes it easily distinguishable from other fibers such as cotton. The flax fibers are twisted or spun together to make linen thread. The thread used to make the Shroud was spun by hand rather than on a spinning wheel, indicating use of this older



Figure 5. Small of the back on the dorsal image (magnified 32x).
Рис. 5. Нижня частина Плащаниці, вид ззаду (збільшення 32х).

technology. This indicates the fabric was probably made earlier than about the 12th century.

Microscopic View of Threads in the Shroud

Figure 5 shows a photomicrograph of the Shroud at the small of the back on the dorsal image at a 32x magnification. This shows how the linen thread was woven together to make the 3-to-1 herringbone weave of the Shroud. This weave makes a stronger, more durable cloth but requires more time to produce so it is more expensive. It also shows a significant amount of blood at this location. This is evidently blood that ran down from the side wound shown on the front image.

Figure 6, at a magnification of 64x, is a closer view to help us understand how the images of the crucified man were formed on the Shroud. This photo shows the tip of the nose where the image is strongest. It should be noticed that this photo indicates no evidence of pigment, binder, clumping of the fibers or threads, or capillarity (soaking up of a liquid). The only thing we see is that in some areas the top one or two layers of fibers in a thread are slightly discolored with a straw-yellow or light tan color. All fiber discoloration has the same color, so the various shades in the images are due to the number of discolored fibers and the length of the discoloration in each fiber. This is what forms the images.

Previous Research on the Shroud

It is often said that the Shroud is the most researched artifact in human possession. Research on the Shroud can be divided into four periods. These four periods and their conclusions are summarized below.

- 1898 to 1977: The images were formed by a crucified man that was wrapped in the Shroud. This is indicated primarily by the nature of the blood on the Shroud.
- 1978 to 1987: Extensive experiments indicate the images are not due to paint, scorch, liquid,



Figure 6. Tip of the nose (magnified 64x).
Рис. 6. Зображення кінчика носа (збільшення 64х).

or photography. The methodology for image formation could not be determined.

- 1988 to 2016: The Shroud was carbon dated in 1988 to a range of 1260-1390 AD (two sigma). This allegedly proved the Shroud could not be authentic.
- 2017 to 2022: The 1988 measurement data was finally released for review in 2017. Statistical analysis of the data proved the samples were not homogeneous (that is, representative of the rest of the Shroud), indicating the certainty of the 1260-1390 AD date should be rejected because it may or may not be true.

Scientific testing of the Shroud began in 1898 when an Italian amateur photographer named Secondo Pia took the first photograph of the cloth. He would have expected his photographic plate to show a poor-resolution negative image of the face, but instead it contained a good-resolution positive image. This meant the image on the Shroud was a good-resolution negative image, with light and dark areas reversed. Therefore, the image could not be a painting because an artist prior to 1898, or 1578 or 1355, could not have painted a good-resolution image of what he had never seen (a negative image of a face). Research continued over the next eight decades by very qualified people in the United States and other countries. This list includes the following, along with their years of research on the Shroud:

- Dr. Yves Delage, Professor of Comparative Anatomy, Paris: 1900-1902
- Dr. Paul Vignon, Professor of Biology, Paris: 1900-1943
- Dr. Pierre Barbet, Professor of Anatomy, Paris: 1932-1961
- Dr. Robert Bucklin, MD, Forensic Examiner, LA: 1941-1993
- Dr. Frederick Zugibe, Chief Medical Examiner, NY: 1953-2002
- Dr. Alan D. Adler, Professor of Chemistry, Connecticut State University: 1978-2000

- Dr. John Heller, Professor of Medical Physics, Yale: 1978-1995
- Dr. John Jackson, Professor of Physics, Air Force Academy: 1978-2021
- Dr. Baima-Bollone, Chief of Forensic Medicine, Turin: 1978-2021

These individuals in general concluded that the dead body of a crucified man had been wrapped in the Shroud and in some unknown way had encoded front and dorsal images of itself onto the burial cloth in which he was wrapped. This belief was largely based on the pristine, unbroken appearance of the edges of the blood clots, with their indented centers and raised edges, and the clear blood serum extending beyond the blood clots due to capillarity.

The only opportunity for a comprehensive scientific examination of the Shroud occurred in 1978. The discovery in 1975 by John Jackson, professor of physics at the Air Force Academy, that the images contained 3D information led to the formation of the Shroud of Turin Research Project (STURP). In 1978, the Vatican allowed STURP, led by Jackson, to send 26 American scientists to Turin to perform nondestructive experiments on the Shroud for a total of 120 hours. They worked in three shifts over a period of five days (Heller 1984; Jumper 1982). The members of STURP made extensive preparations for testing and obtained donations of scientific equipment worth about US\$2.5 million. STURP's experiments on the Shroud included:

- light (up to 1000x) and electron microscopy
- photography, various wavelengths, front and back
- UV spectrophotometry of fluorescence
- X-ray fluorescence and absorption radiography
- thermal photography
- mass spectrography
- laser-microprobe Raman spectroscopy
- attempts to alter color on fibers using acids, bases, oxidants, reductants, and organic chemicals

Testing was also done for the presence of protein in the images, and multiple tests were done to determine whether what appeared to be blood was blood. The conclusion of these tests indicated the presence of blood on the Shroud. But the main objective of STURP was to determine how the images were formed. They concluded the images could not be the product of paint, dye, or stain because there was no pigment on the fibers, no evidence of a binder to hold pigment, no brush strokes, no clumping of fibers or threads, no stiffening of the cloth, and no cracking of the images along fold lines.

STURP also found no capillarity (soaking up of liquid) in the fibers or threads, so the images could not be due to a liquid such as an acid or an organic or inorganic chemical in a liquid form.

A scorch caused by a hot object will fluoresce (emit light in the visible range) when exposed to ultraviolet light. When the Shroud was exposed to an ultraviolet light, the scorches caused by the fire in 1532 did fluoresce, but the images did not fluoresce. This indicated the images were not formed by contact of a hot object with the cloth. The images on the Shroud could also not be the result of a photographic process because the images contain 3D information. Photographs and paintings do not contain 3D information.

STURP also concluded that only the top one or two layers of fibers were discolored out of about 100 fibers in a thread. This discoloration did not extend across the entire 15 to 20 μm diameter of the fibers but only discolored the fibers to a thickness of less than 0.2 μm , which is about 2% of the radius. In general, this thin discolored layer extends around the entire circumference of a fiber over much of the length of the discoloration.

STURP concluded this discoloration is not due to any substance or material (atoms) added to the fibers but rather is the result of a rearrangement of the atoms already in the fibers. The discoloration process can be described as a dehydration-oxidation process that formed the images of the crucified man. Specifically, the discoloration is due to some of the single electron bonds of the carbon atoms in the cellulose being changed to double electron bonds. This causes the molecule to vibrate differently; therefore, it reflects light differently, so it appears discolored.

What could cause the fiber to be discolored only on the outer 2% of the fiber's radius? Various concepts have been proposed to explain this and other individual features of the Shroud, but the hypothesis of an extremely brief, intense burst of radiation is attractive because it is the only concept that is consistent with the evidence and can explain the three main mysteries of the Shroud—namely, image formation, carbon dating, and features of the blood (Rucker 2020a).

Mystery #1: Formation of the Images

The first mystery to be considered is formation of the images on the Shroud (Fanti et al. 2005). Three things are needed to form the images: a mechanism to discolor the fibers, energy to drive the discoloration mechanism, and information to control the discoloration mechanism. This information is needed to control which fibers are discolored and the length of the discoloration on each fiber, because it is the discoloration on the fibers that forms the images of the crucified man.

It is difficult to determine how the images were formed, so the solution methodology will be similar to solving a maze. A maze is a type of puzzle that has

a start point at the entry into the maze and a finish point at the exit from the maze. The objective is to draw a line that goes through the maze from the start point to the finish point. In a difficult maze, it is often best to start from both the start and finish points and work toward the middle, where hopefully the two lines will meet. How the images were formed on the Shroud will be solved in a similar fashion by working from both the starting point (Why can we see the images?) and the ending point (What could have caused the fiber discoloration?) to determine if the two approaches can be part of a consistent solution.

Why can we see the images?

The key to answering this question is information. For example, why can we recognize a person in a photograph? It is because the information that defines the person's appearance (colors, shades, positions) has been encoded into the pattern of the pixels in the photo. The same is true for the Shroud. We can see the images of a crucified man on the Shroud because the information that defines the form of a crucified man has been encoded into the pattern of the discolored fibers on the cloth (Rucker 2016). The information that defines the form of a crucified man was only inherent to the body that was wrapped in the cloth. It was not inherent to the limestone of the tomb. Thus, this information had to be carried, transported, or communicated from the body and be deposited on the cloth.

However, this information is not the information that defines how we would see the body in reflected light. Instead, it is the information that specifies the vertical distance between the body and the cloth at each point. This is the 3D information that is encoded into the images (Jackson 1989; Jackson and Jumper 1976). Because this information is the vertical distance between the body and the cloth at each point, this information was most likely deposited on the cloth by something that traveled vertically from the body to the cloth and was altered as it traveled vertically across the air gap. Radiation is the only option that can satisfy these requirements. It can travel vertically from the body to the cloth because both particles and photons of light travel straight in the direction in which they are emitted. They can communicate the vertical gap distance by their intensity (number of particles or photons), with the intensity being diminished by absorption and scattering in the air, and possibly by decay for particles.

Many, if not most, Shroud researchers believe the images were formed by radiation. Only vertically collimated radiation emitted from the body can communicate to the Shroud the information that is encoded in the images and deliver this information in a focused manner (Rucker 2020b). This would be

necessary to produce the good-resolution front and dorsal images with the correct width of the face while not producing images of the sides of the body or the top of the head.

Vertically collimated radiation allows each point on the cloth to have received information from only one point on the body: the point vertically above or below it. This one-to-one correspondence is required to prevent the information from becoming confused, which would cause a significant loss of resolution in the images. If the radiation had been emitted uniformly in all directions, then innumerable lenses would have been required between the body and the cloth to focus the radiation on each fiber to form the good-resolution images. Since such lenses would not have been between the body and the cloth, the radiation must have been vertically collimated. The radiation being vertically collimated is also the best option to produce the realistic width of the face that is on the Shroud.

Other characteristics of the radiation can also be determined. Laser experiments indicate that to produce the extreme superficiality of the images (with only the top one or two layers of fibers in a thread discolored and only the very thin outer layer of the fibers discolored), the radiation must have been emitted in an extremely brief and intense burst of radiation (de Figueiredo 2015).

What could have caused the fiber discoloration?

It is the discoloration on the fibers that forms the images. Thus, how the fibers were discolored to a thickness of less than 0.2 μm must also be explained. One possibility is the molecular structure of the fibers could have been altered by a chemical attack from outside the fibers—for example, by ozone produced by an electrical discharge from the fibers. Another possibility is the molecular structure of the fibers could have been altered by heat deposited in this very thin 0.2 μm region. Due to electromagnetic effects, an alternating current in a conductor will flow primarily near the circumference of the conductor. If the frequency of an alternating current in a fiber is high enough, the electron flow and thus the heat deposition could be in the thin 0.2 μm outer region of the fiber. This could also be related to an electrical discharge between the body and the top fibers facing the body, with the electrical discharge rapidly alternating in direction, as occurs between a lightning rod and a thunder cloud in a lightning strike.

Since both ozone production and this heat deposition could have resulted from an electrical discharge from the top fibers facing the body, the radiation that caused it was probably primarily charged particles rather than electromagnetic radiation. These charged particles had to have low energy because the fibers on the Shroud do not show an increase in the number of ion tracks.



Figure 7. Location of samples for carbon-14 dating (designated by arrow in top left corner).

Рис. 7. Розташування зразків для датування по вуглецю-14 (позначено стрілкою у верхньому лівому куті)

Thus, it is hypothesized the images were formed by an extremely brief, intense burst of vertically collimated low-energy radiation (primarily charged particles) that transported energy and information from the body to the cloth. This energy and information were required to form the images. Radiation from the body can explain why the images are on the inside of the wrapped configuration, why the images are negative images, why there is 3D information in the images, why bones (teeth, hands, etc.) in the body can apparently be seen in the images, why threads that are discolored produced a shadow in the discoloration on the fibers below them, and so on. Rucker (2020b) lists 17 reasons for this radiation hypothesis and Rucker (2019) lists 21 reasons. It is hypothesized this radiation caused an electrical discharge from the top fibers facing the body (Rucker 2019), which produced heat and/or ozone that altered the molecular structure in the thin $0.2 \mu\text{m}$ circumferential region of the fiber. This could have led to the images slowly developing as the fibers were gradually discolored in the thin region, probably over a period of months to years as the atoms settled

into their lowest energy states. This gradual process is evidenced by experiments involving proton irradiation of linen (Lind 1989).

Mystery #2: Carbon Dating

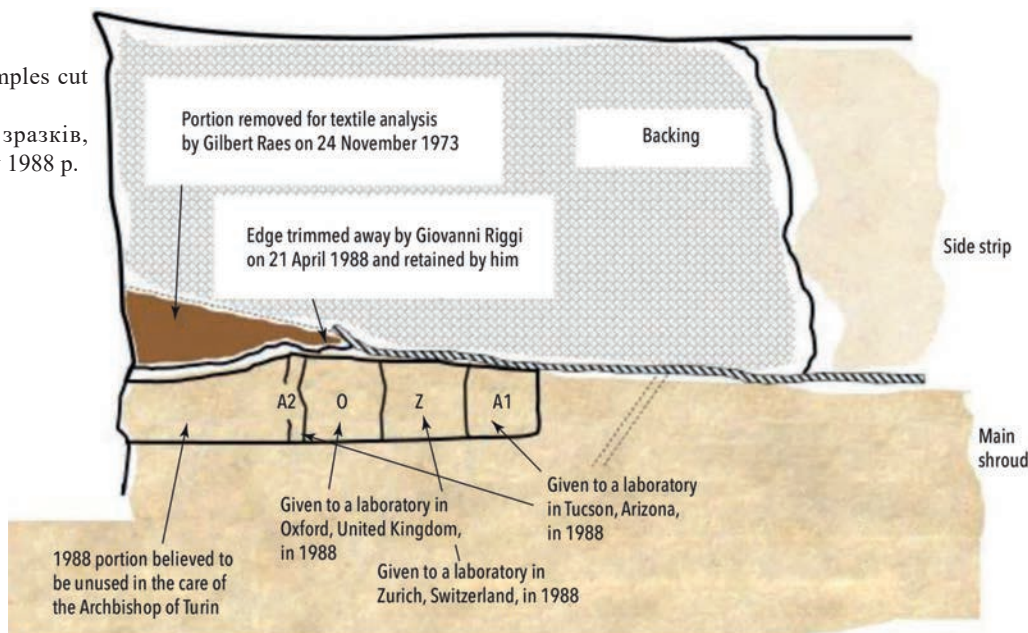
The second mystery is the carbon dating of the Shroud. It is helpful to first discuss how carbon dating is performed. The carbon dating process can be separated into three phases:

1. *The first phase* is to remove samples from the item to be dated. The item must contain carbon, such as a dead plant or animal. These samples will be consumed in the carbon dating process, so they are usually a very small fraction of the entire item. To produce a valid date for the entire item, the samples must be representative of the item. This is usually best achieved by taking the samples from a variety of locations throughout the item. As we will see, this was not done for the 1988 dating of the Shroud because all three of the samples were cut from one corner of the Shroud, next to each other.

2. *The second phase* is to measure the ratio of carbon-14 to carbon-12 (C-14/C-12) in each sample. In this process, each sample can be divided into subsamples, which each have their C-14/C-12 ratio measured, as was done in the 1988 dating of the Shroud. Each C-12 atom contains six neutrons and six protons in the central nucleus of the atom ($6 + 6 = 12$), with six electrons in orbits around the nucleus. Each C-14 atom contains eight neutrons and six protons in the nucleus of the atom ($8 + 6 = 14$), again with six electrons in orbits around the nucleus. The additional two neutrons in the nucleus of the C-14 atom cause it to be unstable so that it decays with a 5730-year half-life, which means that in each 5730-year period half of the C-14 will decay, and thus will no longer be present. The C-12 atoms do not decay (in other words, they are stable), so that the C-14/C-12 ratio will naturally decrease with a 5730-

Figure 8. Location of samples cut from the Shroud in 1988.

Рис. 8. Розташування зразків, вирізаних з Плащаниці у 1988 р.



year half-life. As will be explained, it is believed that the C-14/C-12 ratios for the Shroud subsamples were accurately measured, so that both these ratios and their uncertainties should be believed.

3. *The third phase* is to calculate the date of the item from the C-14/C-12 ratios, assuming the C-14/C-12 ratios have only changed due to the decay of C-14 since the plant or animal died. However, this assumption is not necessarily true due to carbon with a different C-14/C-12 ratio either being added or removed from the samples since the plant or animal died, or possibly due to neutron absorption having produced new C-14 in the samples. It is believed this last option is the best explanation for the 1988 carbon dating of the Shroud, as explained next.

In 1988, samples were cut from a corner of the Shroud and sent to three laboratories in Oxford, United Kingdom; Zurich, Switzerland; and Tucson, Arizona, for carbon dating (Figures 7 and 8). Results were published in 1989 in the journal *Nature* (Damon et al. 1989). The mean* of the three laboratory mean values was $1260 \text{ AD} \pm 31$ years (one sigma). This is called the uncorrected value. When corrected for the changing C-14 concentration in the atmosphere, a range of 1260 to 1390 AD (two sigma) was obtained. However, there are several reasons why most Shroud researchers believe the certainty of the 1260-1390 AD date should be rejected because it may or may not be true (Rucker 2020c). These include:

- The technology to make the images did not exist in 1260-1390. It does not exist even today. Every attempt to make the images today has failed macro and/or microscopically.
- There are 13 other date indicators that contradict the 1260-1390 date (Rucker 2020d).
- The measured carbon dates depend on the distance from the bottom of the Shroud (Figure 9). This means the samples were not representative (not homogeneous) of the rest of the Shroud. The non-homogeneity of the samples has been confirmed by four recent papers in peer-reviewed journals (Casabianca et al. 2019; di Lazzaro et al. 2020; Walsh and Schwalbe 2020, 2021), and is consistent with previous statistical analysis of the measurement data (Rucker 2018).
- The carbon dates from Oxford and Arizona are different by 104 ± 35 years, which is a three sigma difference ($104/35 = 2.97$). The usual acceptance criterion for no

statistically significant difference is two sigma, so this indicates the dates have a high probability of being different. This should not be the case since both samples came from the same piece of cloth. This indicates something strange is going on. Technically, this indicates the samples are evidently not homogeneous (not representative of the Shroud) due to the presence of a systematic error, which means the certainty of the carbon dates should be rejected.

- A chi-squared statistical analysis of the measurement data (values and uncertainties) indicates the distribution of the measured subsample dates has only a 1.4% chance of being explained by the stated uncertainties (significance level $p = 0.014$ in Table 6 of Rucker [2018] and Table 4 of Walsh and Schwalbe [2020]). This indicates a systematic error was likely present. If a systematic error was present, then the certainty of the uncorrected mean value of 1260 ± 31 should be rejected, so the corrected range of 1260-1390 should also be rejected.

When the three laboratories measured the C-14/C-12 ratios of the Shroud subsamples, they also measured the C-14/C-12 ratios of samples from three cloths of known historical dates (Damon et al. 1989). The carbon dates obtained for these three standards were in reasonable agreement with their historical dates, which indicates the C-14/C-12 ratios were being measured correctly. Thus, it should be assumed the C-14/C-12 ratios of the Shroud subsamples were measured correctly. But if the C-14/C-12 ratios were measured correctly, then the systematic error cannot be in the C-14/C-12 ratio measurements, so it must have been in the samples. This means that something must have altered the C-14/C-12 ratios in the samples to

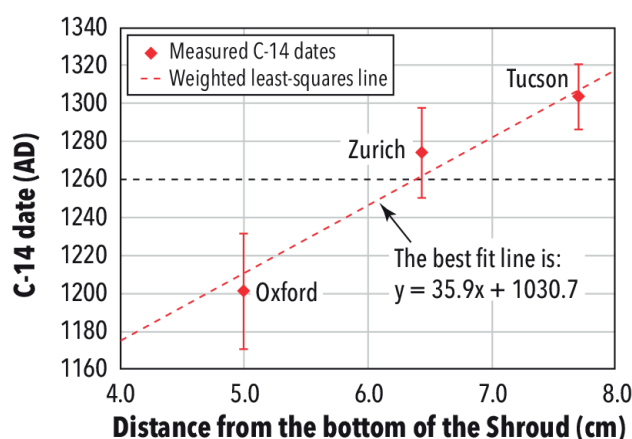


Figure 9. Measured dates as a function of sample location.

Рис. 9. Виміряні дати як функція розташування зразка.

*In statistical analysis, the average value of a series of measurements is called the « mean». The uncertainty associated with this mean value can be illustrated by a Gaussian distribution, which is also called a bell curve. This curve plots the probability of how close the true value should be to the mean value, which is at the peak of the bell curve. The uncertainty of the mean value, and thus the width of the bell curve, is expressed in a calculated value known as the standard deviation. The symbol used for the standard deviation is the Greek letter sigma (σ), so that an uncertainty of one standard deviation is called a one sigma uncertainty. The mean value plus or minus one sigma (one standard deviation) should have about a 68% probability of having the true value within this range. The mean value plus or minus two sigma (two standard deviations) should have about a 95% probability of having the true value within this range. The mean value plus or minus three sigma (three standard deviations) should have about a 99% probability of having the true value within this range. However, these probability values depend on the number of measurements that were made to determine the values for the mean and standard deviation.

produce the systematic error. Some believe this occurred when newer cloth was invisibly interwoven into the older cloth of the Shroud (Marino and Benford 2000), but this hypothesis cannot explain all the evidence.

When the carbon dates and one sigma uncertainties obtained by the three laboratories are plotted as a function of distance from the bottom of the cloth (Oxford, Zurich, and Tucson, shown left to right in Figure 9), a sloped, red-dashed line through the three points is a better fit to the data than assuming all three samples had the same date of 1260 AD, which is the black-dashed line. The slope in the red line is about 36 years per centimeter, which is 91 years per inch. At this rate, if the sample point is moved by 10 in. (25 cm), then the carbon date would change by 910 years; that is, from the uncorrected carbon date of 1260 AD to a future date of 2170 AD. Thus, this slope in the carbon date could be very significant.

The hypothesis that is consistent with everything we know to be true about carbon dating as it relates to the Shroud is the neutron absorption hypothesis (Rucker 2020c). If the radiation emitted from the body that caused the images also included neutrons, then a small fraction of these neutrons would be absorbed in the trace amount of nitrogen in the cloth to produce new C-14 in the fibers (Lind et al. 2010) by the $N-14 + \text{neutron} \rightarrow C-14 + \text{proton}$ reaction. Tom Phillips, in 1989 in the journal *Nature*, was the first to document his hypothesis that neutron absorption could have altered the date obtained in the 1988 carbon dating of the Shroud.

This production of new C-14 would cause the carbon dating process to produce a more recent carbon date than the true date. For example, the carbon date would be shifted from 33 AD to the midpoint of the range 1260-1390 AD by an increase in the C-14 atom density in the samples of only 16.9%. Based on a series of nuclear analysis computer calculations (discussed next), this would occur if 2×10^{18} neutrons were emitted from the body, which is only one neutron for every ten billion neutrons in the body, based on an estimated body weight of 170 lb (77.1 kg). This would occur, for example, if only 0.0004% of the deuterium, or heavy hydrogen, atoms in the body were to fission. Deuterium is of special interest because it requires the least energy input to fission. This would release enough neutrons to shift the carbon date from 33 AD to 1260-1390 AD and approximately enough protons to produce the images, according to experiments of proton irradiation on linen (Lind 1989).

This neutron absorption hypothesis is the best concept to explain the carbon dating of the Shroud to 1260-1390 AD because it is the only hypothesis consistent with the four things we know to be true about carbon dating as it relates to the Shroud:

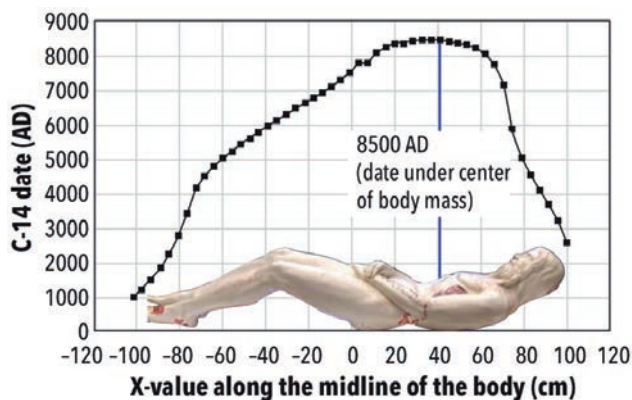


Figure 10. Carbon-14 dating on the Shroud below the body.

Рис. 10. Датування по вуглецю-14 на Плащаниці під тілом.

- The uncorrected carbon date at the 1988 sample location is 1260 ± 31 .
- The slope or gradient to the carbon dates is about 36 years per centimeter of distance from the bottom of the cloth.
- The carbon dates for the subsamples are in the range of 1155 to 1410 AD.
- The Sudarium of Oviedo is an 84 x 53 cm linen cloth that has been in the cathedral in Oviedo Spain since 1113 AD. It contains no image but does contain blood stains similar to the Shroud of Turin. Ancient tradition claims the Sudarium is Jesus's face cloth mentioned in John 20:7 and thus is connected to the Shroud of Turin. Historical documents state it left Palestine prior to 614 AD. It was carbon dated to about 670 AD.

Using this hypothesis of neutrons homogeneously emitted from the body as it lay in a limestone tomb, a long series of MCNP nuclear analysis computer calculations were run. MCNP is an acronym for Monte Carlo N-Particle, where «N» stands for neutron. MCNP was developed at the Los Alamos National Laboratory over many decades and is approved by the US Nuclear Regulatory Commission (NRC) for nuclear analysis for a variety of purposes. It has been confirmed by comparison of thousands of nuclear experiments with MCNP calculations.

Figure 10 shows some of the results of these MCNP calculations. The vertical axis on this figure shows the carbon date calculated by MCNP for a location along the midline (backbone) of the body on the cloth under the body (on the dorsal image). The calculated carbon dates are quite variable, with about 90% of the locations dating to the future when the standard equations are used to calculate the date. A carbon date to the future is calculated when there is a higher C-14/C-12 ratio in a sample than is present in our environment.

The second point from the left in Figure 10 is approximately where the samples were cut from the Shroud in 1988 for carbon dating. The MCNP-calculated slope at this point agrees with the experimental slope, about 36 years per centimeter in

Figure 9, obtained from carbon dating measurements at the three laboratories. The results of the MCNP calculations appear to have also received independent confirmation from the position dependence of the fluorescence on the Shroud (McAvoy 2021) based on photos taken by STURP in 1978.

Mystery #3: Blood

The third mystery is related to the blood. About a dozen tests have been performed on the blood. The results of these tests proved that what appears to be blood is blood. All results are also consistent with it being human blood, though further testing is needed to exclude other possible options. Blood could have drained from the body onto the cloth where there were wounds in the scalp, wrists, side, and feet. However, the problem is explaining how the blood—which would have dried on the skin—could have transferred to the cloth. Examples are the blood that drained from the wrist wounds and ran down the arms, and the blood from the scourging.

Since dried blood does not absorb into cloth, why is the blood that would have dried on the body now on the cloth? The hypothesis of an extremely brief intense burst of radiation emitted in the body offers a possible explanation. If the radiation burst was sufficiently brief and sufficiently intense, it would thrust wet or dried blood off the body onto the cloth by a natural process called radiation pressure. This is a process by which radiation transfers momentum to an object, which causes it to move. But the radiation would have to be particle radiation. Examples of particle radiation include neutrons, protons, and electrons. Electromagnetic radiation such as ultraviolet light would vaporize the blood before it caused the blood to move significantly.

Future Testing of the Shroud

The last extensive testing of the Shroud was performed in 1978 after the Shroud was put on exhibition in Turin. There are rumors of another exhibition in 2025, and it is hoped the Vatican will allow additional testing following the exhibition.

To encourage a decision to allow such testing, a carefully planned program for the future testing of the Shroud should be

developed for the Vatican to consider. The Shroud was owned by the Savoy family in Italy starting about 1453, but in 1983 the Shroud was willed to the reigning pope, so the Pope will make the final decision.

This testing program should take advantage of the significant advances in nondestructive testing technology since the last extensive testing in 1978. The following are some of the questions that should guide future testing of the Shroud:

Image Formation

- nature and location of discoloration
- evidence of bones, backside image, or coins over the eyes

- cause of banding and mottling
- distribution of fluorescence on the Shroud
- other evidence of radiation on the Shroud

Dating

- carbon dates for other locations
- evidence of other long-lived isotopes produced by neutron absorption, such as Cl-36 and Ca-41, on the Shroud or in the tomb
- evidence of an invisible reweave at the 1988 sample location
- other dating methods: reflectance, tensile strength, and so on

Blood

- location, shape, composition, serum rings
- Is blood human, male, type AB?
- DNA genome? What race?
- Why is it reddish? Is neutron absorption a possible explanation?
- Has the blood been retouched with paint?

History

- pollen
- limestone chips, dust, debris
- side piece and stitch

The following techniques have been suggested for future testing of the Shroud:

light and electron microscopy

- multispectral and hyperspectral imaging
- X-ray fluorescence
- Fourier transform infrared spectroscopy
- Raman and energy dispersive spectroscopy
- atom probe tomography
- nuclear activation analysis
- radiation detection methods

Discussion

A hypothesis has been discussed as a possible explanation for three of the most significant mysteries of the Shroud. This hypothesis proposes that an extremely brief intense burst of radiation from the body produced heating and/or ozone that discolored the fibers to form the images of a crucified man. This burst of radiation included neutrons that produced new carbon-14 in the fibers, which shifted the carbon date forward from the time of Jesus, about 33 AD, to 1260-1390 AD. If it was brief enough and intense enough, the radiation burst could have thrust the dried blood off the body onto the cloth by a natural process called radiation pressure.

The most important questions regarding the Shroud of Turin are whether it could be the authentic burial cloth of Jesus Christ and whether the images could have been encoded onto the cloth by a burst of radiation emitted from his dead body. If the evidence indicates these questions should be answered in the affirmative, then the implications for all humanity could be extremely significant. The importance of these questions should compel us to do our very

best scientific research on the Shroud, and to take advantage of every opportunity to do this research.

There is no known example of a human body, dead or alive, producing an image of itself on a piece of cloth, except for the Shroud of Turin. In our current understanding of physics, there is no mechanism or process that can do this. Yet, in the Shroud, there is evidence that a dead human body produced front and dorsal images of itself on linen cloth. From the perspective of science, this unique encoding event appears to require a unique process or mechanism that is outside or beyond our current understanding of physics. Thus, to help humanity gain a more complete and accurate understanding of reality, further scientific testing should be performed on this unique historical artifact. There is a possibility for significant scientific research to be performed on the Shroud following the rumored exhibition of the Shroud in 2025. Every effort should be made to prepare a testing program to take advantage of this possibility.

ACKNOWLEDGMENTS

This article was reviewed for accuracy by Arthur C. Lind, PhD (physics) and Mark Antonacci, JD. Figures 1 and 3 are reproduced courtesy of the Barrie M. Schwartz Collection, STERA Inc., and Figures 5 and 6 are reproduced courtesy of the Mark Evans Collection, STERA Inc.

AUTHOR

Robert (Bob) A. Rucker: MS, Nuclear Engineering, University of Michigan; robertarucker@yahoo.com

CITATION

Materials Evaluation 80 (2): 24-36

<https://doi.org/10.32548/2022.me-02022>

©2022 American Society for Nondestructive Testing

REFERENCES

1. Casabianca, T., E. Marinelli, G. Pernagallo, and B. Torrisi, 2019, «Radiocarbon Dating of the Turin Shroud: New Evidence from Raw Data», *Archaeometry*, Vol. 61, No. 5, pp. 1223-1231, <https://doi.org/10.1111/arcm.12467>
2. Damon, P.E., D.J. Donahue, B.H. Gore, A.L. Hatheway, A.J.T. Jull, T.W. Linick, P.J. Serce, L.J. Toolin, C.R. Bronk, E.T. Hall, R.E.M. Hedges, R. Housley, I.A. Law, C. Perry, G. Bonani, S. Trumbore, W. Woelfli, J.C. Ambers, S.G.E. Bowman, M.N. Leese, and M.S. Tite, 1989, «Radiocarbon Dating of the Shroud of Turin», *Nature*, Vol. 337, pp. 611-615 de Figueiredo, L.C., 2015, «Dr. Paolo Di Lazzaro Explains His Research on Image Formation on the Shroud of Turin», available at https://www.academia.edu/11355553/Dr_Paolo_Di_Lazzaro_explains_his_research_on_image_formation_on_the_Shroud_of_Turin
3. Di Lazzaro, P., A.C. Atkinson, P. Iacomussi, M. Riani, M. Ricci, and P. Wadhams, 2020, «Statistical and Proactive Analysis of an Inter-Laboratory Comparison: The Radiocarbon Dating of the Shroud of Turin», *Entropy*, Vol. 22, No. 9, p. 926, <https://doi.org/10.3390/e22090926>
4. Fanti, G., F. Lattarulo, and O. Scheuermann, 2005, «Evidences for Testing Hypotheses About the Body Image Formation of

- the Turin Shroud», *The Third Dallas International Conference on the Shroud of Turin, 8-11 September, Dallas, TX*
5. Heller, J., 1984, *Report of the Shroud of Turin*, Houghton Mifflin Co.
6. Jackson, J., 1989, «The Vertical Alignment of the Frontal Image», available at <https://www.shroud.com/pdfs/ssi3233part3.pdf>
7. Jackson, J.P., and E.J. Jumper, 1976, «The Three Dimensional Image on Jesus' Burial Cloth as Revealed by Computer Transformation», personal correspondence dated 30 July, to Peter M. Rinaldi, author of many books on the Shroud. Contact robertarucker@yahoo.com to obtain a copy.
8. Jackson, J.P., E.J. Jumper, and W.R. Ercole, 1984, «Correlation of Image Intensity on the Turin Shroud with the 3-D Structure of a Human Body Shape», *Applied Optics*, Vol. 23, pp. 2244-2270
9. Jumper, E.J., 1982, «An Overview of the Testing Performed by the Shroud of Turin Research Project with a Summary of Results», *IEEE Proceedings of the International Conference on Cybernetics and Society*
10. Lind, A.C., 1989, «Image Formation by Protons», available at <https://www.testtheshroud.org/articles>
11. Lind, A.C., M. Antonacci, G. Fanti, D. Elmore, and J.M. Guthrie, 2010, «Production of Radiocarbon by Neutron Radiation on Linen», available at <https://www.semanticscholar.org/paper/Production-of-Radiocarbon-by-Neutron-Radiation-on-Lind-Antonacci/61ec4a8c6ed72fec1cde5cf-124368dc0bf089344>
12. Marino, J.G., and M.S. Benford, 2000, «Evidence for the Skewing of the C-14 Dating of the Shroud of Turin Due to Repairs», available at <https://shroud.com/pdfs/marben.pdf>
13. McAvoy, T., 2021, «On Radiocarbon Dating of the Shroud of Turin», *International Journal of Archeology*, Vol. 9, No. 2, pp. 34-44, <https://doi.org/10.11648/j.ija.20210902.11>
14. Rucker, R.A., 2016, «Information Content on the Shroud of Turin», Paper 5, available at www.shroudresearch.net/research.html
15. Rucker, R.A., 2018, «The Carbon Dating Problem for the Shroud of Turin, Part 2: Statistical Analysis», Paper 12, available at www.shroudresearch.net/research.html
16. Rucker, R.A., 2019, «How the Image Was Formed on the Shroud», Paper 27, available at www.shroudresearch.net/research.html
17. Rucker, R.A., 2020a, «Holistic Solution to the Mysteries of the Shroud of Turin», Paper 24, available at www.shroudresearch.net/research.html
18. Rucker, R.A., 2020b, «Role of Radiation in Image Formation on the Shroud of Turin», Paper 6, available at www.shroudresearch.net/research.html
19. Rucker, R.A., 2020c, «Understanding the 1988 Carbon Dating of the Shroud», Paper 25, available at www.shroudresearch.net/research.html
20. Rucker, R.A., 2020d, «Date of the Shroud of Turin», Paper 29, available at www.shroudresearch.net/research.html
21. Walsh, B., and L. Schwalbe, 2020, «An Instructive Inter-Laboratory Comparison: The 1988 Radiocarbon Dating of the Shroud of Turin», *Journal of Archaeological Science: Reports*, Vol. 29, <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2019.102015>
22. Walsh, B., and L. Schwalbe, 2021, «On Cleaning Methods and the Raw Radiocarbon Data from the Shroud of Turin», *International Journal of Archeology*, Vol. 9, No. 1, pp. 10-16, <https://doi.org/10.11648/j.ija.20210901.12>

Prepermission to Reprint 18.05.2022:

The American Society for Nondestructive Testing, Inc.

CITATION

Materials Evaluation 80 (2): 24-36

<https://doi.org/10.32548/2022.me-02022>

©2022 American Society for Nondestructive Testing

ДАТИ, ПОДІЇ, ФАКТИ З ІСТОРІЇ ТЕХНІЧНОГО КОНТРОЛЮ

(календар II кв.)

1 квітня 1976 р. засновано американську технологічну компанію Apple з офісом у Купертіно (Каліфорнія), яка проектує та розробляє комп'ютери, програмне забезпечення, онлайн-сервіси та побутову електроніку. Apple була заснована Стивом Джобсом, Стивом Возняком та Рональдом Вейном. Apple – це найбільша у світі компанія в області інформаційних технологій. 30.06.2021 р. Apple офіційно відкрила офіс в Україні, у компанії також з'явилася підтримка українською мовою. Apple планує самостійно ввозити техніку в Україну та контролювати магазини офіційних дилерів. Програмне забезпечення Apple працює в сучасних комплексах діагностики та неруйнівного контролю



4 квітня 1975 р. Білл Гейтс та Пол Аллен заснували компанію Microsoft Corporation – найбільшу в світі компанію-виробник програмного забезпечення. Головний офіс розташований у корпоративному кампусі в Редмонді (Вашингтон, США). Це багатонаціональна корпорація комп'ютерних технологій із 124 тис. працівників у 102 країнах. Найпопулярнішими продуктами корпорації є операційні системи Microsoft Windows та офісний пакет Microsoft Office. Компанія також продає апаратне забезпечення та розважальні продукти Xbox та MSN TV. Після буму на ринку персональних комп'ютерів «Ай-БіЕм» (IBM PC) в середині 80-х років минулого століття Microsoft випустила операційну систему MS-DOS, стала одним із лідерів ринку програмного забезпечення



7 квітня 1795 р. у Франції прийняли закон, що вводив метричну систему мір. Так, метр визначався як одна десятиміліонна частка відстані від полюса до екватора. Метрична система вимірювання заснована на метрі як мірі довжини та кілограмі як мірі маси. Зокрема метричною є Міжнародна система одиниць SI. У наш час більшість країн світу перейшли на метричну систему одиниць вимірювання. Винятком залишаються США, М'янма та Ліберія. У Великій Британії метрична система використовується поряд із імперськими одиницями. Основна відмінність метричної системи від традиційних систем, які застосовувалися раніше, полягає у використанні упорядкованого набору одиниць вимірювань



10 квітня 1861 р. засновано Массачусетський технологічний інститут (MTI) — один із найкращих у США та загалом у світі технічний університет. Заснований Вільямом Бартоном Роджерсом університет у м. Кембридж, штату Массачусетс, США, головним своїм завданням вважає навчання та дослідження практичного застосування науки та технологій. MTI складається з кількох шкіл і має в собі також 34 академічні департаменти та 53 міждисциплінарні лабораторії, центри та програми. MTI відіграв ключову роль у розвитку комп'ютерів, систем інерціальної навігації та ін. Інститут публікує свої курси у відкритому доступі. Це стало прикладом для наслідування іншими навчальними закладами. У 2012–2020 рр. у світовому рейтингу університетів MTI займав I місце



10 квітня 1954 р. у Дніпропетровську створене Особливе конструкторське бюро (ОКБ-586), нині – Конструкторське бюро «Південне» ім. М.К. Янгеля, головне підприємство космічної галузі України. Конструкторське бюро було створено на базі конструкторського відділу Південного машинобудівного заводу з метою побудови для Збройних Сил СРСР стратегічних ракетних комплексів з балістичними ракетами на висококиплячих компонентах ракетного палива. КБ діяло на чолі кооперації з організацій-розроблювачів ракетних систем і елементів ракетних комплексів. Головним підприємством-виробником створених КБ «Південне» ракет став Південний машинобудівний завод. З 1970-х рр. у КБ працює численний відділ неруйнівного контролю ракетної техніки



11 квітня 1913 р. у Києві народився Володимир Гнатович Хоткевич (помер у 1982 р.) – український вчений-фізик, фахівець в області фізики низьких температур, ректор Харківського державного університету (1966–1975 рр.), член-кореспондент АН УРСР з 1967 р. Він опублікував понад 200 робіт з фізики металів, проблем надпровідності, низькотемпературної металофізики, теплової діагностики тощо. З 1975 р. завідував кафедрою експериментальної фізики ХДУ, а з 1979 р. – кафедрою фізики низьких температур ХДУ



Редакція журналу буде вдячна читачам за доповнення до дат, подій та фактів з НК



12 квітня 1981 р. з космодрому на мисі Канаверал у США здійснено запуск першого пілотованого багаторазового транспортного космічного корабля NASA «Колумбія». Будівництво «Колумбії» розпочато в 1975 р. і 25.03.1979 р. «Колумбію» було передано на випробування в NASA. Шаттл названо іменем вітрильника, на якому капітан Роберт Грей у травні 1792 р. досліджував внутрішні води Британської Колумбії (нині штати США Вашингтон і Орегон). Командиром екіпажу був ветеран американської космонавтики Джон Янг, пілотом – Роберт Кріппо. Політ був (і залишається) унікальним: фактично найперший випробувальний запуск космічного корабля, який проводився з екіпажем на борту. На превеликий жаль у 2003 р. під час свого останнього польоту шатл згорів при вході в земну атмосферу



14 квітня 2022 р. уражений українськими ракетами Р-360 «Нептун», затонув флагман ЧФ ВМФ Росії ракетний крейсер «Москва». Р-360 «Нептун» – українська противоракетна крилата ракета, розроблена в київському конструкторському бюро «Луч» у 2010–2020 рр. З 2020 р. береговий комплекс РК-360МЦ «Нептун» прийнятий на озброєння Збройних сил України. Ракета має бойову частину масою 150 кг, дальність її дії до 280 км. Під час виробництва ракет застосовувались радіаційний та вихрострумний методи неруйнівного контролю, а також контроль герметичності паливних баків мас-спектрометричним методом



17 квітня 1931 р. у м. Жовква біля Львова народився Любомир Романків – провідний науковець компанії IBM у галузі комп'ютерних технологій, співвинахідник (разом із Девідом Томпсоном) процесів створення тонкоплівкових індуктивних і магніторезистивних мікроголовок для запису інформації, що сприяло появі жорстких дисків і персональних комп'ютерів, автор і співавтор понад 65 патентів. Сім'я Романків виїхала до Європи в 1944 р. Освіту він здобув в Університеті Альберти та Массачусетському технологічному інституті (доктор філософії в галузі металургії та матеріалознавства, 1962 р.). Автор понад 150 статей, відредагував 10 томів матеріалів різних технічних симпозіумів. Директор відділу електрохімічної технології й магнетизму Дослідного центру IBM



21 квітня 1958 р. під час проведення Брюссельської всесвітньої виставки було наголошено про створення електрошлакового зварювання (ЕШЗ). Метод ЕШЗ був розроблений співробітниками Інституту електрозварювання ім. Е. О. Патона на початку 1950-х рр. ЕШЗ є одним з різновидів зварювання плавленням. Він заснований на виділенні тепла при проходженні електричного струму через рідкий шлак, за рахунок чого розплавляються кромки зварювальних деталей і присадний метал, а також підтримується висока температура розплаву. Цей вид зварювання відкривав великі можливості у виробництві важкого металургійного, ковальсько-пресового і іншого устаткування. Перед розробниками методів та засобів неруйнівного контролю постала нова задача – випробування зварних швів великої товщини



25 квітня 1990 р. виведений на орбіту шатлом «Діскавері» STS-31 орбітальний телескоп Хаббл. На сьогоднішній день це одне з найсучасніших обладнань для дослідження в космосі. Для створення цього складного апарату застосовували ряд зварювальних технологій. При виготовленні спеціальних легких пористих дзеркал використовувалася лазерне зварювання. Виготовлення космічних апаратів завжди супроводжується великим об'ємом випробувальних та контрольних операцій, особливо коли мова йде про апарати багаторазового використання



27 квітня 1967 р. відкрилася Всесвітня виставка EXPO-67, символом якої стала Монреальська біосфера. Побудована як павільйон американської експозиції, біосфера стала згодом одним із символів міста Монреаль. Конструкція має вигляд великої кулі, який складається з безлічі з'єднаних зварюванням між собою частин. Кожна з них виглядає як спеціальне молекулярне з'єднання, що належить до особливого класу так званих аллотропних форм вуглецю. У травні 1976 р. в ході ремонтних зварювальних робіт купол біосфери загорівся. Детальне технічне обстеження, дефектоскопія та розрахунки підтвердили можливість подальшої експлуатації цієї цікавої інженерної споруди

1 травня 1931 р. на Мангеттені відкрито Емпайр-Стейт-Білдинг, що залишався найвищим хмарочосом світу протягом 42 років. Хмарочос висотою 381 м (448 м з антеною), що має 102 поверхи, зведений у стилі ардеко і став першою будівлею у світі, яка мала понад 100 поверхів. У 1986 р. Емпайр-Стейт-Білдинг увійшов до списку пам'яток архітектури національного значення США. У 2007 р. будівля під номером один увійшла до списку найкращих американських архітектурних рішень за версією Американського інституту архітекторів. У 1972 р. північна вежа Всесвітнього торгового центру обігнала Емпайр-Стейт-Білдинг за висотою і стала найвищою будівлею у світі. Після руйнування веж Всесвітнього торгового центру в результаті терористичного акту 11.09.2001 р. Емпайр-Стейт-Білдинг став найвищою будівлею Нью-Йорку



6 травня 1994 р. відкрито Євротунель під Ла-Маншем між Францією та Британією – одну з найбільших будівель 20-го століття і символ об'єднаної Європи. Тунель має довжину близько 51 км, з них 39 км – безпосередньо під дном моря. Ідеї сталого сполучення через протоку існували ще з 1802 р. У спорудженні двох транспортних та одного сервісного тунелів було задіяно 11 прохідницьких щитів. Тунелем курсують пасажирські потяги Євростар, побудовані на основі французьких TGV, та човникові потяги для перевезення вантажу; тунель має власний парк сервісних машин. Термінали для авто знаходяться в Черітоні та Кокуель, та мають сполучення з британськими та французькими автострадами. Американське товариство цивільних інженерів оголосило Євротунель одним з семи чудес сучасності



7 травня 1950 р. під керівництвом Євгена Оskarовича Патона закінчено проектування конструкції і розробку технології будівництва найбільшого в Європі суцільнозварного моста через р. Дніпро в Києві (нині – міст ім. Є. О. Патона). Міст довжиною 1543 м і шириною 27 м балочної конструкції з суцільними головними балками двотаврового перерізу довжиною 58 м і висотою 3,6 м введено в експлуатацію 1.11.1953 р. У 2020 р. фахівці ІЕЗ ім. Є.О. Патона виконали технічне обстеження несучих зварних метало конструкцій мосту. Результати обстеження передані інституту «Укрпроектстальконструкція», який є головним розробником проекту ремонту мосту



19 травня 1743 р. ліонський фізик Жан-П'єр Крістен (1683–1755 рр.) представив проект першого ртутного термометра, який використовував шкалу Цельсія. Його пропозиція в 1743 р. змінити шкалу термометра Цельсія (від кипіння води при 0 градусів та танення льоду при 100 градусах, де нуль позначає точку замерзання води, а 100 – точку кипіння води) було широко прийнято і використовується досі. Перші термометри, що використовувалися у Франції, були виготовлені за показаннями Рене Антуана де Реомюра, який в 1730 р. створив спиртовий термометр і завдав градуювання, розділену на 80 частин між температурою плавлення води 0° і температурою кипіння 80°

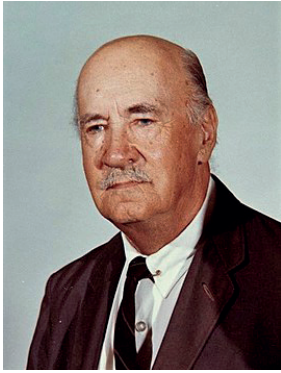


23 травня 1910 р. у Києві на Сирецькому іподромі відбувся перший політ вітчизняного літака конструкції професора Політехнічного інституту Олександра Кудашева (1872–1917 рр.). Це був формений біплан із тягнучим гвинтом, вагою 320 кілограмів, оснащений двигуном «Анзані» потужністю 35 к.с. Він мав переднє кермо висоти, кермо керування і хвостове оперення-стабілізатор. Каркас літака із площею несучих поверхонь 32 кв. м був зроблений із дерев'яних рейок і обтягнутий прогумованим полотном. Політ був недовгим – на кілька десятків метрів, але першим у Російській імперії польотом літака вітчизняного виробництва (за винятком двигуна)



23 травня 1931 р. народився проф. Петро Васильович Балабуєв (помер у 2007 р.) – український авіаконструктор, Герой України, д.т.н. З 1954 р. після закінчення Харківського авіаційного інституту він працює на АНТК ім. О.К. Антонова. У 1965 р. його було призначено першим директором Київського механічного заводу, а з 1968 р. він став Головним конструктором під час створення важкого літака для перевезень великогабаритних вантажів Ан-124 «Руслан». За його участю та під його керівництвом побудовано літаки: Ан-22 «Антей», Ан-72, Ан-74, Ан-32, Ан-28, Ан-124 «Руслан», Ан-225 «Мрія», Ан-38, Ан-140, Ан-70





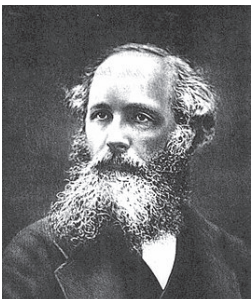
25 травня 1889 р. в Києві народився Ігор Іванович Сікорський (помер у 1972 р.) – видатний авіаконструктор українського походження, що працював у Російській імперії та Сполучених Штатах. У 1908–1912 рр., навчаючись у Київському політехнічному інституті, спроектував і побудував 6 моделей гелікоптерів та літаків-біпланів. Пізніше в Санкт-Петербурзі під його керівництвом були побудовані одні з перших у світі багатомоторні літаки «Гранд» (1913 р.) та «Ілля Муромець» (1914 р.). У 1918 р. емігрував до Французької республіки, а в 1919 р. переїхав до США. У 1923 р. він заснував авіаційну фірму «Sikorsky Aircraft». У 1925–1940 рр. розробив серію надзвичайно успішних літаків, які принесли США престиж та рекорди. Наприклад, побудований в 1934 р. гідроплан Sikorsky S-42 встановив десять світових рекордів, а 10 серійних S-42 стали першими у світі міжконтинентальними пасажирськими лайнерами, які забезпечили регулярні рейси через Атлантичний і Тихий океани. З 1939 р. перейшов на конструювання гелікоптерів одновинтової схеми



26 травня 1901 р. народився Борис Павлович Грабовський (помер у 1966 р.) – український винахідник, що запатентував, реалізував на практиці, продемонстрував електронну систему телебачення, за допомогою якої вперше в світі здійснив безпроводну передачу на відстань рухомого зображення. У 1925 р. Б. Грабовський у співавторстві зі своїми однодумцями М. Піскуновим та В. Поповим подали документи на патентування повністю електронного ТБ (патент № 5592 отримали 30.06.1928 р.). У 1928 р. в Ташкенті відбулась публічна демонстрація ТБ та приймання науковою комісією. На зеленому екрані приймальної трубки діаметром 20 см спостерігали пішоходів, трамвай, що перетинав площу, та обличчя людини. Зображення було стійким та чітким. Безпроводна передача рухомих зображень здійснювалось на відстані десятків метрів



13 червня 1773 р. народився Томас Юнг (помер у 1829 р.) – англійський вчений широкого профілю: фізик (один із засновників хвильової теорії світла), механік, лікар (першим описав явище астигматизму), ботанік, астроном, філолог і сходознавець. Поліглот – розмовляв 13-ма мовами. Відомий своїми дослідженнями в галузях механіки суцільних середовищ та оптики. Пояснив акомодацию ока, першим описав астигматизм, заклали основи теорії капілярних явищ. За обсяг інтересів і фундаментальність наукового вкладу колеги характеризували Юнга як «останню людину, що знала все»



13 червня 1831 р. народився Джеймс Максвелл (помер у 1879 р.) – шотландський вчений, який створив теорію електромагнітного поля і на її підставі зробив висновок, що змінні електричне і магнітне поля тісно пов'язані одне з одним, утворюючи єдине електромагнітне поле, яке поширюється у вигляді електромагнітних хвиль зі швидкістю світла. Ґрунтуючись на зв'язку електричних, магнітних та світлових явищ, Максвелл розробив теорію світла і тим об'єднав в одне ціле раніше розрізнені галузі електрики, магнетизму і оптики. Крім цього, Максвеллу належать відкриття і в інших галузях фізики, зокрема, молекулярної кінетичної теорії газів (максвеллівський розподіл молекул за швидкостями), законів дифузії, теплопровідності, внутрішнього тертя, статистичної природи другого закону термодинаміки («демон Максвелла»)



19 червня 1623 р. народився Блез Паскаль (помер у 1662 р.) – французький філософ, письменник, фізик, математик. Один із засновників математичного аналізу, теорії ймовірності та проективної геометрії, творець перших зразків лічильної техніки, автор основного закону гідростатики. Відомий також винаходом гідравлічного преса, шприца та іншими відкриттями. Закон Паскаля (основне рівняння гідростатики) – тиск на рідину в стані теплової рівноваги передається в усіх напрямках однаково. На основі гідростатичного закону Паскаля працюють різноманітні гідравлічні пристрої: гальмівні системи, гідравлічні преси тощо. Згодом Паскаль зосередився на доведенні того, що стовпчик ртуті в скляній трубці утримується тиском повітря. Він також підтвердив припущення Торрічеллі про існування атмосферного тиску. На честь Паскаля названа одиниця вимірювання тиску (Паскаль), а також популярна мова програмування Pascal