

# 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](mailto: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 °К (25...30 °С). 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

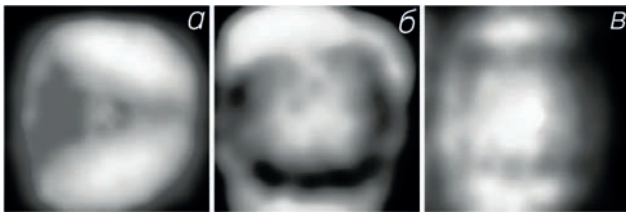


Рис. 1. Теплові зображення поверхні зразків з дефектами у формі: *a* – трикутника, *b* – кола, *c* –прямокутника

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 розрахувувалась 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:

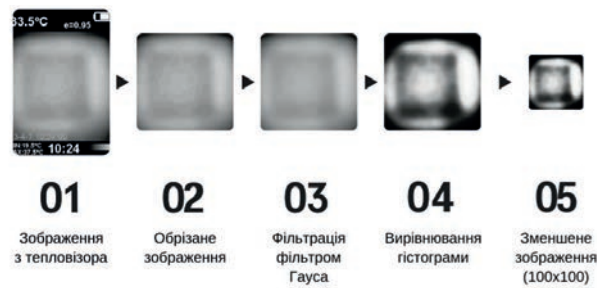


Рис. 2. Алгоритм попередньої обробки теплового зображення у вигляді прямокутника

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 гистограми, 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;

$\tau$  – 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

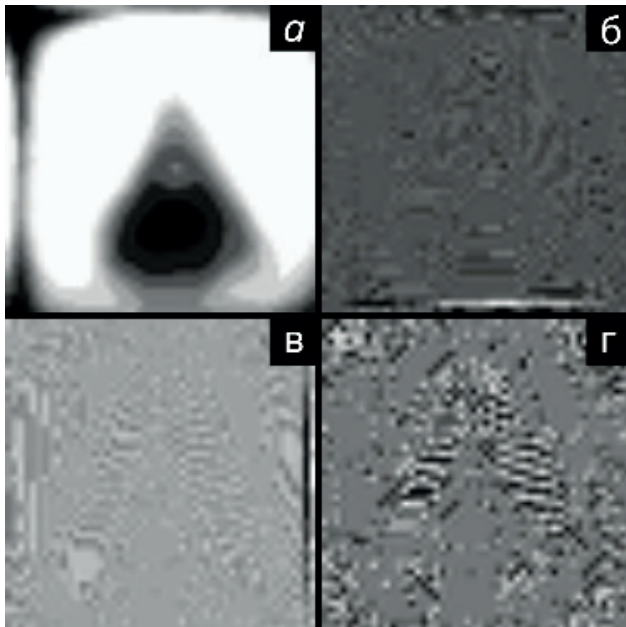


Рис. 3. Графічне подання масивів коефіцієнтів вейвлет-перетворення теплового зображення: а – низькочастотні; б–г – високочастотні

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 попіксельного 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.

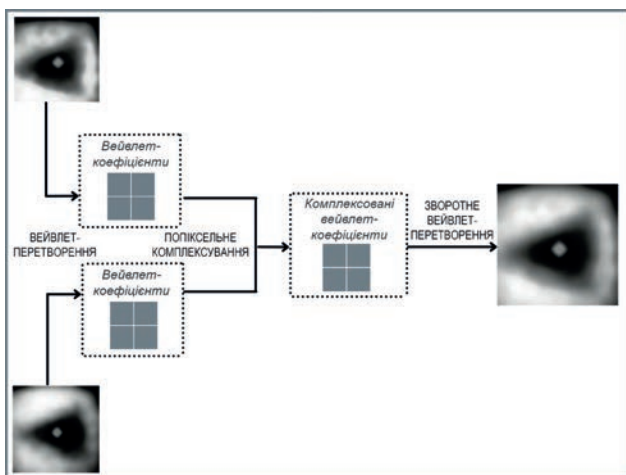


Рис. 4. Узагальнена схема алгоритму комплексуювання теплового зображення на основі вейвлет-перетворення

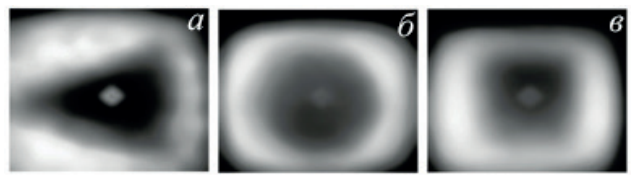


Рис. 5. Результат комплексуювання теплових зображень поверхні зразків з дефектами у формі: а – трикутника, б – кола, в – прямокутника

З метою експерименту також було проведено комплексуювання односцевових 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>

