

## АНОТАЦІЯ

Момот А. С. Удосконалення методу визначення характеристик дефектів багатошарових матеріалів за результатами активного теплового контролю. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2020.

В дисертації вперше отримані такі нові наукові результати:

1. Запропоновано метод автоматизованої обробки послідовності термограм, отриманих у результаті активного теплового контролю багатошарових матеріалів, який використовує нейромережеві технології для аналізу температурних профілів у кожній точці об'єкту та дозволяє одночасно проводити класифікацію знайдених дефектів, вимірювати їх глибину залягання та розкрити.

2. Набув подальшого розвитку метод синтезу нейронної мережі прямого розповсюдження зі зворотним поширенням помилки, який враховує залежності достовірності контролю та точності дефектометрії від архітектури та алгоритмів навчання нейронної мережі, що дозволило обґрунтувати вибір кількості прихованих прошарків нейронної мережі, кількості нейронів у цих прошарках та оптимального за показником середньоквадратичної помилки мережі алгоритму навчання.

3. Удосконалено метод формування навчального набору даних, який враховує залежності достовірності класифікації дефектів у багатошарових матеріалах, похибок визначення їх глибини залягання і розкрити від параметрів вибірки навчальних сигналів, що дозволило мінімізувати час навчання нейронної мережі без погіршення достовірності автоматизованої класифікації дефектів та точності дефектометрії.

Практичне значення одержаних в дисертаційній роботі результатів полягає в тому, що було розроблено алгоритмічне і програмне забезпечення реалізації підсистеми визначення характеристик дефектів за результатами активного ТНК із використанням вдосконаленого методу на базі нейромережових технологій, що дозволило автоматизувати класифікацію дефектів і побудову теплових томограм, підвищити точність теплової дефектометрії і достовірність контролю у порівнянні з існуючими методами. Розроблено віртуальний інтерфейс користувача, який містить інструменти для проведення дефектометрії та аналізу теплових томограм, що дало змогу покращити ефективність аналізу результатів контролю. Для розробленої системи експериментально визначено архітектуру та параметри навчання нейромереж, за яких досягається найвища достовірність класифікації дефектів та точність вимірювання їх характеристик. Розроблено та виготовлено експериментальний стенд та дослідні зразки для проведення активного теплового контролю і аналізу результатів із використанням удосконаленого методу визначення характеристик дефектів на основі нейронних мереж, що дозволило відпрацювати програмні алгоритми та підтвердити ефективність даного методу.

У дисертаційній роботі описано особливості та проблеми теплового контролю виробів із багатошарових матеріалів. Показано, що на сучасному етапі розвитку методів теплового неруйнівного контролю важливим завданням є не лише виявлення та визначення координат і поперечних розмірів дефектів багатошарових матеріалів, але і вимірювання їх глибини залягання та розкриву. Проведено аналіз факторів, які впливають на результати теплового контролю та описано характер взаємозв'язків між інформативними параметрами. Розглянуто традиційні математичні та статистичні методи теплової дефектометрії та встановлено їх недоліки. Описано, що аналітичний розв'язок обернених задач теплового контролю в ряді випадків є неоднозначним. Особливо низьку ефективність традиційні методи та побудовані на їх основі системи теплової дефектометрії мають у випадку контролю багатошарових матеріалів.

В роботі проведено порівняльний аналіз стандартних та спеціальних методів цифрової обробки термограм. Розглянуто методи Фур'є-аналізу,

вейвлет-аналізу, аналізу головних компонент та динамічної теплової томографії. Показано, що дані методи мають низьку завадостійкість, сильну залежність результатів від вибору опорної точки та рівномірності нагріву об'єкту контролю. Окрім того, розглянуті традиційні методи обробки термограм не дозволяють проводити автоматичну класифікацію дефектів за типом та визначати їх розкриття.

У дисертаційній роботі описано можливості використання штучних нейронних мереж для удосконалення методів визначення характеристик дефектів. Розглянуто особливості побудови нейромережових систем для вирішення задач класифікації дефектів та визначення їх глибини залягання і розкриття. Проведено порівняння ефективності роботи нейронних мереж та традиційних методів обробки термограм. Показано переваги нейронних мереж над традиційними алгоритмами.

Розглянуто найбільш перспективні області застосування нейромережових систем аналізу результатів активного теплового неруйнівного контролю. Проведено аналіз існуючих робіт за напрямом теплового контролю композитів. Показано, що у відомій літературі не вирішуються завдання одночасної класифікації дефектів за типом та визначення їх глибини залягання і розкриття; не досліджено способи визначення глибини залягання дефектів або їх розкриття шляхом вирішення задачі регресії за допомогою нейронних мереж; не вирішується завдання побудови теплових зображень внутрішньої структури об'єкту контролю. Сформовано мету дослідження у вигляді автоматизації процесу активної теплової дефектоскопії та дефектометрії із застосуванням нейромережових технологій, що забезпечуватиме підвищення інформативності, достовірності та ефективності контролю виробів із багатошарових матеріалів.

З метою удосконалення методів активної теплової дефектоскопії і дефектометрії та автоматизації обробки даних в дисертації обґрунтовано та розроблено підсистему цифрової обробки термограм, що складається з трьох нейромережових модулів. Описано можливість використання багатошарових нейронних мереж прямого розповсюдження зі зворотним поширенням помилки з повнозв'язними прошарками у складі модуля виявлення та класифікації дефектів та модулів визначення глибини залягання і розкриття дефектів.

Сформовано алгоритми формування навчальних множин для задач класифікації дефектів та визначення їх глибини залягання і розкриву. Описано процедуру навчання нейромережових модулів та розроблено відповідне програмне забезпечення в середовищі MATLAB. Виконано програмну реалізацію віртуальних приладів в середовищі NI LabVIEW, в яких втілено алгоритми роботи нейромережових модулів та пост-обробки результатів. Створено графічний інтерфейс користувача, який містить елементи керування, інструменти для проведення дефектометрії та блоки графічного відображення інформації щодо положення дефектів та внутрішньої структури об'єкту контролю.

На основі проведеного комп'ютерного моделювання процесу активного теплового контролю алюмінієвої пластини зі штучними внутрішніми дефектами отримано послідовності термограм. Встановлено, що внаслідок впливу високого рівня теплової дифузії та нерівномірності нагріву обробка отриманих послідовностей термограм традиційними методами є ускладненою та малоефективною. В результаті досліджень доведено, що розроблена автоматизована нейромережева система має покращені якісні та кількісні показники ефективності у порівнянні з традиційними методами.

У роботі проведено комп'ютерне моделювання процесу активного теплового контролю зразка із багатошарового вуглепластику зі штучними внутрішніми дефектами. За результатами досліджень ефективності обробки отриманих послідовностей термограм різними методами встановлено, що розроблена нейромережева система забезпечує найвищі показники якості класифікації дефектів та точності дефектометрії серед розглянутих методів.

Досліджено вплив архітектури нейронних мереж на результати роботи нейромережових модулів розробленої системи у випадку обробки даних комп'ютерного моделювання. Дослідження показали, що найбільш оптимальним є використання двох прихованих прошарків з 12 нейронами в першому та 4 нейронами в другому прошарках. Встановлено, що із доступних алгоритмів навчання найбільш ефективним за показником середньоквадратичної помилки мережі є оптимізатор Левенберга-Маркарда.

Проведено дослідження впливу обсягу та якості навчальної вибірки на результати роботи нейромережових модулів. Встановлено кількісні значення погіршення показників ефективності роботи системи. У випадку зменшення кількості навчальних зразків в чотири рази, на 7,55 % знижується значення критерію Танімото та на 14,74 % зростає відносна похибка визначення глибини залягання дефектів. Водночас, в чотири рази зменшується час навчання. Аналогічні результати отримано і для випадку зменшення репрезентативності вибірки.

Розроблено та виготовлено 2 тестових та 5 навчальних зразків у вигляді пластин із багат шарових композиційних матеріалів, які містять штучні внутрішні дефекти з відомими параметрами. Зразки використовувались для проведення експериментальних досліджень ефективності роботи розробленої автоматизованої системи. Для проведення експериментів було виготовлено стенд для проведення активного теплового контролю за схемою з двостороннім доступом до об'єкту.

За результатами експериментальних досліджень встановлено, що в реальних умовах архітектура нейронних мереж відповідних модулів має бути ускладнена до 35 нейронів в першому та 15 нейронів в другому прихованому прошарках. Дослідження показали, що розроблена система дозволяє проводити безпомилкове виявлення та класифікацію дефектів за типом. Оцінка глибини залягання та розкриття дефектів із використанням розробленої системи відбувається з максимальною похибкою  $\pm 3,19\%$  та  $3,50\%$  відповідно. Доведено, що розроблена система має підвищену достовірність контролю та точність дефектометрії у порівнянні з традиційними алгоритмами навіть в умовах нерівномірного нагріву. На основі результатів досліджень сформульовано рекомендації щодо методики контролю із використанням розробленої автоматизованої системи.

**Ключові слова:** неруйнівний контроль, тепловий контроль, тепла дефектометрія, тепла томографія, теплове поле, композиційні матеріали, нейронні мережі, нейромережовий класифікатор, мережа прямого розповсюдження, зворотне поширення помилки, машинне навчання.

## SUMMARY

Momot A. Improvement of the method for defining defects characteristics of multilayered materials by active thermal testing. – Qualifying scientific work, the manuscript.

Thesis for a PhD degree in specialty 151 "Automation and Computer-Integrated Technologies". – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, 2020.

In the dissertation the following new scientific results were first received:

1. The method of automated processing of thermograms sequences in active thermal testing of multilayer materials is proposed, which uses neural networks to analyze the temperature profiles at each point of the object and allows to simultaneously classify the founded defects, measure their depth and thickness.

2. The method of feedforward backpropagation neural network synthesis, which takes into account dependencies of reliability of testing and accuracy of defectometry on architecture and algorithms neural network training, has been further developed. This made it possible to justify the choice of the number of hidden layers of the neural network, the number of neurons in these layers, and the optimal by mean squared error indicator training algorithm.

3. The method of forming a training dataset has been developed, which takes into account dependencies of defect classification reliability in multilayered materials, errors of determining their depth and thickness from the parameters of the training signals sampling, which allowed to minimize learning time of neural network without impairing the reliability of automated defects classification.

The significance of practical thesis results are that the algorithmic and software implementation of defect characterization subsystem based on the results of active thermal nondestructive testing were developed using an improved neural network-based method, which made it possible to automate the classification of defects and construct thermal tomograms. and increase the reliability of testing compared to existing methods. A virtual user interface has been developed that includes tools for

defectometry and thermal tomography analysis, which made it possible to improve the efficiency of analysis of control results. For the developed subsystem, the architecture and parameters of neural networks training were experimentally determined, at which the highest accuracy of defect classification and precision of measuring their characteristics were achieved. An experimental stand and prototypes for active thermal testing and analysis of its results were developed and manufactured using an improved neural network method, which allowed to work out software algorithms and confirm the effectiveness of this advanced method of defect characterization.

The thesis describes that in the present stage of methods of thermal non-destructive testing development important task is not only to identify and determine the coordinates and transverse dimensions of defects, but also to measure their depth and thickness. The factors that influence on results of thermal testing are analyzed and the nature of relationship between informative parameters is described. Traditional mathematical and statistical methods of thermal defectometry are considered and their disadvantages are established. It has been described that the analytical solution of inverse thermal testing tasks is ambiguous in some cases. Particularly low efficiency traditional methods and thermal defectometry systems based on them have in the case of multilayer materials testing.

The comparative analysis of standard and special digital processing of thermograms methods is carried out in the work. The methods of Fourier analysis, wavelet analysis, principal component analysis and dynamic thermal tomography are considered. As have been shown, these methods have low noise immunity, a strong dependence of results on the choice of anchor point and a uniform heating of the object of testing. In addition, considered traditional methods of thermogram processing do not allow the automatic classification of defects by type and to determine their thickness.

The thesis describes the possibilities of using artificial neural networks for improvement of defect characterization methods. Features of construction the neural network systems for solving tasks of defects classification and their depth and thickness determination are considered. The performance of neural networks and traditional methods of thermogram processing are compared. Advantages of neural networks over traditional algorithms are shown.

The most promising areas of application of neural network systems of analysis of active thermal non-destructive testing results are considered. Features and problems of thermal testing of products made of multilayer composite materials are described. Analysis of existing works in the field of thermal defectometry of composites, in particular, using neural networks, is done in this thesis. It is shown that in known literature the tasks of simultaneous defects classification by type and determination of their depth and thickness are not solved; the methods of determining defects depth or their thickness by solving the regression task using neural networks or traditional methods have not been investigated; the task of constructing thermal tomograms of object of testing internal structure is not solved. Research aim in the form of development of a neural network automated system of thermal fields complex analysis, which will have higher efficiency in comparison with systems based on traditional methods of thermogram processing is formed in this thesis.

In order to improve the methods of thermal defectoscopy and defectometry and automate data processing, a subsystem of digital thermogram processing consisting of three neural network modules has been substantiated and developed in the thesis. Possibility of using feedforward backpropagation multilayer neural networks with fully-connected layers in defects detection and classification module and modules of determining defects depth and thickness is described.

Algorithms of formation of training datasets for tasks of defects classification and determination of their depth and thickness are formed. The procedure of neural network modules training is described and the corresponding software is developed in MATLAB. Software implementation of virtual devices, which embodies algorithms of neural network modules and results post-processing is implemented in NI LabVIEW software. A graphical user interface for an automated thermal field analysis system has been created. That includes controls, defectometry tools and blocks for graphically displaying information about defects location and the internal structure of object of testing.

Based on computer simulations of the process of active thermal testing of an aluminum plate with artificial internal defects, thermogram sequences were obtained. It is established that due to influence of high level of thermal diffusion and uneven



heating, processing of the obtained thermogram sequences by traditional methods is complicated and ineffective. As a result of research, it is proved that the developed automated neural network system has improved qualitative and quantitative indicators of efficiency in comparison with traditional methods.

The computer simulation of the process of active thermal testing of a multilayer carbon fiber specimen with artificial internal defects is carried out. According to results of efficiency evaluation of obtained thermogram sequences processing by different methods, it is established that the developed neural network system provides the highest indicators of quality of defect classification and defectometry accuracy among considered methods.

The influence of neural network architecture on performance of neural network modules of developed system in case of computer simulation data is investigated. Studies have shown that the most optimal use is two hidden layers with 12 neurons in the first and 4 neurons in the second layer. It is established that the Levenberg-Markard optimizer is the most effective of the available learning algorithms in terms of networks mean squared error.

The influence of volume and quality of the training dataset on the results of neural network modules work has been investigated. Quantitative values of deterioration of system performance indicators were established. If the number of training samples is reduced by four times, the value of Tanimoto criterion is reduced by 7.55 % and relative error of defects depth estimation is increased by 14.74 %. At the same time, training time is reduced four times. Similar results were obtained for the case of a decrease in dataset representativeness.

During the work, 2 test and 5 training specimens in form of multilayer composite plates containing artificial defects with known parameters were developed and manufactured. The samples were used for experimental researches of developed automated system performance. An appropriate stand was made for the experiments to conduct active thermal testing using double-access testing scheme.

According to the results of experimental researches, it was found that in real-world conditions, the architecture of neural networks of respective modules should be complicated up to 35 neurons in the first and 15 neurons in the second hidden layers.

Researches have shown that developed system allows to carry out error-free detection and classification of defects by type. Estimation of defects depth and thickness using developed system was conducted with the maximum error of  $\pm 3.19\%$  and  $3.50\%$  respectively. It is proved that developed system has higher reliability of testing and accuracy of defectometry in comparison with traditional algorithms even in conditions of uneven heating. Based on the results of research, recommendations on methodology of testing using developed automated system are formulated.

**Keywords:** nondestructive testing, thermal testing, thermal defectometry, thermal tomography, thermal field, composite materials, neural networks, neural network classifier, feedforward network, backpropagation of error, machine learning.

Список публікацій здобувача:

1. Момот А.С. Реалізація нейромережевих алгоритмів класифікації технічного стану композиційних матеріалів за результатами акустичного контролю / А. С. Момот, Р. М. Галаган. // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2017. – №1. – С. 43–46.

*Здобувачем розроблено нейромережеву систему класифікації технічного стану композиційних матеріалів, обґрунтовано ефективність застосування нейронних мереж в якості систем підтримки прийняття рішень у неруйнівному контролі.*

2. Момот А.С. Аналіз методів цифрової обробки термограм / А. С. Момот, Р. М. Галаган. // Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Серія приладобудування. – 2018. – №55. – С. 108–117. (Входить до WorldCat, РИНЦ, Index Copernicus, BASE, OpenAIRE та інших)

*Здобувачем проведено аналітичний огляд існуючих методів цифрової обробки термограм, встановлено переваги використання нейронних мереж перед традиційними методами*

3. Momot A. S. Analysis of application of neural networks to improve the reliability of active thermal NDT / A. S. Momot, R. M. Galagan. // KPI Science News.

– 2019. – №1. – pp. 7–14. (Входить до WorldCat, Index Copernicus, BASE, OpenAIRE та інших)

*Здобувачем проведено комп'ютерне моделювання активного теплового контролю сталеві пластини та обґрунтовано можливість підвищення достовірності контролю із застосуванням нейронних мереж.*

4. Momot A. S. Statistical analysis of thermal nondestructive testing data / A. S. Momot, R. M. Galagan. // Advanced Information Systems. – Kharkiv. – 2019. – №3. – pp. 58–62.

*Здобувачем проведено кореляційний, регресійний та дисперсійний аналіз взаємозв'язків між інформативними параметрами теплового контролю.*

5. Momot A. Influence of architecture and training dataset parameters on the neural networks efficiency in thermal nondestructive testing / A. Momot, R. Galagan. // Sciences of Europe. – 2019. – №44. – pp. 20–25. (Входить до Index Copernicus та інших)

*Здобувачем проведено формування навчальних множин вхідних даних з різними характеристиками, навчено моделі нейронних мереж та встановлено вплив розглянутих параметрів на ефективність розробленої системи.*

6. Momot A. S. The use of ART-2 neural network for processing information signals of non-destructive testing / A.S. Momot, R.M. Galagan. // proc. 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON) Kiev, 29 May-2 June 2017 / IEEE. – 2017. – pp. 981–985.

*Здобувачем обґрунтовано можливості застосування нейронних мереж для обробки інформаційних сигналів неруйнівного контролю, реалізовано та досліджено алгоритми нейронної мережі для класифікації технічного стану об'єкту.*

7. Момот А.С. Застосування нейромережових технологій для вирішення обернених задач неруйнівного контролю / А. С. Момот, Р. М. Галаган. // XVI Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи», 16-17 травня 2017 р., м. Київ, Україна : збірник тез доповідей. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – С. 144.

*Здобувачем проаналізовано сучасний стан та тенденції розвитку методів вирішення зворотних задач теплового неруйнівного контролю, обґрунтовано необхідність застосування нейронних мереж в задачах теплової дефектометрії.*

8. Момот А.С. Теплова томографія із застосуванням штучних нейронних мереж / А. С. Момот, Р. М. Галаган. // XVII Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи», 15-16 травня 2018 р., м. Київ, Україна : збірник тез доповідей. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – С. 178-179.

*Здобувачем обґрунтовано можливість застосування нейронних мереж для побудови теплових томограм, проведено комп'ютерне моделювання процесу теплової дефектометрії із застосуванням нейронних мереж.*

9. Momot A. S. The Use of Backpropagation Artificial Neural Networks in Thermal Tomography / A.S. Momot, R.M. Galagan. // proc. 2018 IEEE First International Conference on System Analysis & Intelligent Computing (SAIC) Kiev, 8-12 October 2018 / IEEE. – 2018. – pp. 1–6.

*Здобувачем обґрунтовано доцільність використання нейронних мереж зворотного поширення помилки в задачах теплової томографії, проведено комп'ютерне моделювання процесу активного теплового контролю та побудовано теплову томограму.*

10. Момот А. С. Нейромережева система теплової дефектометрії / А. С. Момот. // II науково-технічна конференція “НК в контексті асоційованого членства України в ЄС” 15-19 жовтня 2018, м. Люблін, Польща: збірник тез доповідей. – Люблін: УТ НКТД, 2018. – С. 23-26.

11. Момот А.С. Статистический анализ взаимосвязей между информативными параметрами активного теплового неразрушающего контроля / А. С. Момот, Р. М. Галаган. // Приборостроение-2018: материалы 11-й Международной научно-технической конференции, 14-16 ноября 2018 года, Минск, Республика Беларусь. – Минск: БНТУ, 2018. – С. 139-141.

*Здобувачем проведено комп'ютерне моделювання активного теплового контролю, здійснено кореляційний, регресійний та дисперсійний аналіз взаємозв'язків інформативних параметрів теплового контролю.*

12. Momot A. S. Thermal defectometry of composite materials using artificial neural networks / A. S. Momot. // XVIII Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи», 15-16 травня 2019 р., м. Київ, Україна: збірник тез доповідей. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – С. 154-155.

13. Momot, A. Defect classification in active thermal testing with the use of neural networks / A. Momot // Матеріали III науково-технічної конференції «Неруйнівний контроль в контексті асоційованого членства України в Європейському Союзі» з міжнародною участю – NDT – UA 2019, 17-19 вересня 2019 року, м. Київ, Україна. – Київ : УТ НКТД, 2019. – С. 16-18

14. Momot, A. С. Дослідження ефективності нейронних мереж в активному тепловому контролі в залежності від характеристик навчальної вибірки / А. С. Momot, Р. М. Галаган // 9-а Національна науково-технічна конференція і виставка «Неруйнівний контроль та технічна діагностика – UkrNDT-2019», 19-21 листопада 2019 р., м. Київ, Україна: збірник доповідей. – Київ : УТ НКТД, 2019. – С. 229-231.

*Здобувачем проведено навчання нейронних мереж класифікації та визначення глибини залягання і розкриття дефектів, встановлено вплив обсягу та якості навчальної вибірки на результати роботи відповідних мереж.*