

Jarosław Przewłócki*

orcid.org/0000-0001-5617-290X

Zarys współczesnych metod nieniszczących w diagnostyce dziedzictwa architektonicznego

Overview of Modern Non-Destructive Methods in the Diagnosis of Architectural Heritage

Słowa kluczowe: współczesne metody nieniszczące, ochrona dziedzictwa architektonicznego, diagnostyka obiektów zabytkowych

Keywords: modern non-destructive methods, preservation of architectural heritage, diagnostics of historic buildings

Wprowadzenie

Diagnostyka obiektów zabytkowych, mimo znaczącego postępu, jaki nastąpił w ostatnich latach, wciąż pozostaje bardzo czasochłonnym, delikatnym i trudnym zadaniem. Wynika to z konieczności uzyskania precyzyjnych danych dotyczących geometrii konstrukcji i właściwości materiału, z którego została wykonana, ustalenia interakcji między poszczególnymi elementami, a zwłaszcza właściwej interpretacji wyników otrzymanych i analizowanych przy wykorzystaniu coraz bardziej skomplikowanej aparatury.

W pierwszym etapie oceny aktualnego stanu technicznego zabytkowego obiektu, podczas oględzin, prowadzone są badania makroskopowe. Mają one na celu przede wszystkim identyfikację spękań i uszkodzeń, a także wyznaczenie stref zawilgocenia. Badania te często pozwalają również na określenie zmian dokonanych w trakcie eksploatacji obiektu czy nadmiernych deformacji elementów konstrukcyjnych. Szczególnie ważne jest, aby zaobserwowane defekty umożliwiły ustalenie przyczyn ich powstania, a w konsekwencji określenie możliwości naprawy.

Introduction

Despite significant advances in recent years, the assessment of historic structures remains an exceptionally time-consuming, delicate, and challenging endeavor. This is attributable to the need to obtain precise data concerning a structure's geometry and the properties of the materials from which it was constructed, to establish the interactions between individual elements, and particularly to ensure the proper interpretation of results obtained and analyzed using increasingly sophisticated instrumentation.

In the first stage of assessing the current technical condition of a historic structure, macroscopic examinations are carried out during a visual inspection. These are primarily aimed at identifying cracks and damage and delineating zones of moisture accumulation. Such examinations frequently allow for the identification of alterations made during the building's service life, as well as excessive deformation of structural elements. The observed defects must facilitate the determination of their underlying causes and, consequently, an assessment of remediation possibilities.

* prof. dr hab. inż., Wydział Architektury, Politechnika Gdańska

* Prof. D.Sc. Ph.D. Eng. Faculty of Architecture, Gdańsk University of Technology

Cytowanie / Citation: Przewłócki J. Overview of Modern Non-Destructive Methods in the Diagnosis of Architectural Heritage. *Wiadomości Konserwatorskie – Journal of Heritage Conservation* 2026, 86:37–50

Otrzymano / Received: 18.11.2025 • **Zaakceptowano / Accepted:** 23.02.2026

doi: 10.48234/WK86DIAGNOSIS

Praca dopuszczona do druku po recenzjach

Article accepted for publishing after reviews

Istotnym czynnikiem decydującym o wytrzymałości muru, oprócz tworzącego go kamienia czy cegły, jest rodzaj i stan zaprawy stanowiącej spoiwo między łączonymi elementami. Wykruszenie zaprawy czy brak spójności ziaren piasku określa się na podstawie jej oględzin w spoinach zewnętrznych. Dla najczęściej stosowanej w obiektach zabytkowych zaprawy wapiennej podstawowe znaczenie ma zawilgocenie wskutek działania na ściany zewnętrzne wody opadowej czy podnoszonej kapilarnie wody gruntowej. Porowate powierzchnie zaprawy w spoinach wskazują na działanie procesów korozyjnych. W przypadku drewnianych elementów konstrukcyjnych ważne jest określenie degradacji spowodowanej agresywnym oddziaływaniem środowiska atmosferycznego oraz działalnością żywych organizmów, takich jak owady czy grzyby.

Obowiązujące normy dla nowych obiektów budowlanych uwzględniają w istocie, w konserwatywny sposób, niepewności związane z układem konstrukcyjnym lub właściwościami materiału poprzez zastosowanie współczynników bezpieczeństwa. Jednak ich zastosowanie do dawnych budowli, wskutek utraty tkanki historycznej lub zmiany pierwotnej koncepcji konstrukcyjnej, może prowadzić do niewłaściwych wniosków. Wiarygodne dostarczenie informacji na temat wielu różnych aspektów stanu obiektu staje się możliwe dzięki badaniom nieniszczącym (ang. non-destructive testing – NDT), gdyż wykluczają one powstawanie uszkodzeń wynikających np. z pobierania próbek. Takie podejście jest zgodne z wytycznymi konserwatorskimi, gdzie preferowana jest zasada minimalnej ingerencji. Badania nieniszczące pozwalają nie tylko na scharakteryzowanie i identyfikację obiektu, ale również dostarczają szczegółowych informacji o nieciągłościach i wadach konstrukcyjnych, takich jak pęknięcia, zawilgocenia czy mostki termiczne. Umożliwiają także oszacowanie szeregu parametrów niezbędnych do analizy, zwłaszcza fizycznych i mechanicznych charakterystyk konstrukcji. Mimo pewnych kontrowersji metody nieniszczące z powodzeniem są stosowane w historycznych budowlach.

Początek badań nieniszczących sięga przełomu XVIII i XIX w., po tym, jak odkryto promieniowanie rentgenowskie i zastosowano ultradźwięki. Te pierwsze były wykorzystywane przede wszystkim do badania zabytkowych obrazów. Z kolei badania ultradźwiękowe stanowiły pierwszą metodę nieniszczącą stosowaną w budownictwie. Współczesne techniki NDT w diagnostyce obiektów zabytkowych to ogromny skok jakościowy w porównaniu z metodami tradycyjnymi. Można przyjąć, że wiąże się to z tzw. przełomem cyfrowym, który w diagnostyce zabytków nastąpił na przełomie lat 90. XX w. i początku XXI w.

Metody nieniszczące w budownictwie opisano w licznych publikacjach [np. Hoła, Schabowicz 2010, s. 5–18, 2015, s. 1–7; Runkiewicz 2019, s. 26–29; Wutke, Konopska-Piechurska 2018, s. 1–10; El Masri, Rakha 2020, s. 42–53; Chang et al. 2021, s. 25–259]. Przegląd metod nieinwazyjnych stosowanych w odniesieniu do obiektów zabytkowych można również znaleźć w wielu opraco-

A key factor determining masonry strength, in addition to the component stone or brick, is the type and condition of the mortar, which serves as the binding agent between the joined elements. Mortar spalling or a lack of cohesion among sand grains is assessed through visual inspection of the exterior joints. For lime mortar, the most widely used type in historic structures, moisture penetration resulting from rainwater acting on exterior walls or from groundwater rising by capillary action is of primary significance. Porous mortar surfaces in the joints indicate ongoing corrosion. In the case of wooden structural elements, it is essential to assess the extent of degradation caused by aggressive atmospheric exposure and biological activity, such as insects and fungi.

Current standards for new buildings address uncertainties in structural systems and material properties conservatively through the use of safety factors. However, their application to historic buildings may lead to incorrect conclusions due to the loss of historic fabric or alterations to the original structural concept. Non-destructive testing (NDT) provides reliable information on the many varied aspects of a structure's condition, the need for sample extraction, and the damage it entails. This approach is consistent with conservation guidelines, which favor the principle of minimal intervention. Non-destructive testing not only enables the characterization and identification of a structure but also yields detailed information on discontinuities and structural defects, such as cracks, moisture penetration, and thermal bridges. It further enables estimation of a range of parameters required for structural analysis, particularly the structure's physical and mechanical characteristics. Despite some controversy, non-destructive methods have been successfully applied in historic buildings.

The origins of non-destructive testing date back to the turn of the eighteenth and nineteenth centuries, following the discovery of X-rays and the application of ultrasound. X-rays were primarily used to examine historic paintings. Ultrasound testing, on the other hand, was the first non-destructive method applied in construction. Modern NDT techniques for the diagnosis of historic structures represent a considerable qualitative leap over traditional methods. It can be assumed that this is linked to the so-called digital revolution in the diagnostics of historic structures at the turn of the 1990s and the early twenty-first century.

Non-destructive methods in construction have been described in numerous publications [e.g., Hoła, Schabowicz 2010, pp. 5–18, 2015, pp. 1–7; Runkiewicz 2019, pp. 26–29; Wutke, Konopska-Piechurska 2018, pp. 1–10; El Masri, Rakha 2020, pp. 42–53; Chang et al. 2021, pp. 25–259]. An overview of non-destructive methods applied to historic structures can also be found in numerous studies [including Haelterman et al. 1993, pp. 495–499; Van Gemert et al. 1996, pp. 158–163; Schueremans et al. 2003, pp. 46–50; Abu-Zeid et al. 2006, pp. 67–75; Leucci et al. 2007,

waniach [m.in. Haelterman et al. 1993, s. 495–499; Van Gemert et al. 1996, s. 158–163; Schueremans et al. 2003, s. 46–50; Abu-Zeid et al. 2006, s. 67–75; Leucci et al. 2007, s. 222–32; Niemz, Mannes 2012, s. 26–34; Moropoulou et al. 2013, s. 1222–1239; Martinho, Dionísio 2014, s. 1–15; Kloiber et al. 2016, s. 622–631; Zendri et al. 2017, s. 987–1004; Hussain, Akhtar 2017, s. 71–84; Barone, Ferrara 2018, s. 163–170; Bianchi et al. 2018, s. 57–62; Fais et al. 2018, s. 1–11; Adamopoulos, Rinaudo 2021, s. 1–32; Gil et al. 2021, s. 1457–1573; Gupta et al. 2021, s. 2286–2307; Drobiec 2022, s. 60–62; Grzyb et al. 2022, s. 1–16; Krentowski et al. 2023, s. 1–14; Liu et al. 2023, s. 90–114; Moazen et al. 2023, s. 193–208; Said et al. 2023, s. 108–116; Boccacci et al. 2024, s. 160–167; Qian et al. 2024, s. 479–487; Azzi et al. 2025, s. 1–27; Frąckiewicz et al. 2025, s. 27–42; Piersigilli et al. 2025, s. 1–51]. W większości prac omówiono zastosowanie poszczególnych metod, podkreślając ich wady i zalety. Blanca Tejedor i współautorzy [2022, s. 1–22] przeprowadzili analizę bibliometryczną z wykorzystaniem statystyki danych i mapowania naukowego obejmującego okres dwóch dekad (2001–2021) i stwierdzili, że istnieje znaczna luka w ilościowych badaniach NDT.

Obecnie najbardziej rozwiniętą i skuteczną metodą nieniszczącą w diagnostyce obiektów zabytkowych do opisu geometrii jest skanowanie laserowe [Arias et al. 2007, s. 1444–1457; Moropoulou et al. 2013, s. 1222–1239; Fais et al. 2018, s. 1–11; Diz-Mellado et al. 2021, s. 1–17; Krentowski et al. 2023, s. 1–14], a do rozpoznania struktury ośrodka – badanie za pomocą tomografii ultradźwiękowej [Martinho, Dionísio 2014, s. 1–15; Zielińska, Rucka 2018, s. 1–16] oraz radaru penetrującego grunt [Binda et al. 2005, s. 171–179, 2010, s. 473–83; Castellaro et al. 2008, s. 357–366; Pérez-Gracia et al. 2009, s. 1039–1050; Frąckiewicz et al. 2025, s. 27–42]. Coraz większe zastosowanie znajdują też metody termograficzne [Avdelidis, Moropoulou 2004, s. 119–27; Moropoulou et al. 2013, s. 1222–1239; Diz-Mellado et al. 2021, s. 1–17; Krentowski et al. 2023, s. 1–14]. Mogą one być wykorzystywane zarówno do oceny różnych tradycyjnych materiałów i konstrukcji historycznych, jak i technik konserwatorskich w zakresie czyszczenia powierzchni, stabilizacji kruchego materiału (np. konsolidacji cegły lub kamienia) oraz renowacji murów za pomocą zapraw naprawczych.

Zaletą badań nieniszczących jest to, że można je przeprowadzać na każdym etapie użytkowania obiektu, bez konieczności przerywania jego eksploatacji. Ich ograniczeniem jest natomiast niewystarczająca ilość informacji uzyskanych przy zastosowaniu tylko jednej techniki badawczej. Można jednak temu zapobiec, łącząc dwie lub więcej metod. Takie podejście pozwala w wiarygodny sposób wykrywać wady i określać ich możliwe przyczyny oraz stanowi solidną podstawę do podejmowania decyzji dotyczących przyszłych działań konserwacyjnych i renowacyjnych. Przykładowo, trudno jest przeprowadzić badania przy wykorzystaniu georadaru na szorstkich i krzywych powierzchniach, dlatego technika ta powinna być integrowana z innymi metodami NDT.

pp. 222–32; Niemz, Mannes 2012, pp. 26–34; Moropoulou et al. 2013, pp. 1222–1239; Martinho, Dionísio 2014, pp. 1–15; Kloiber et al. 2016, pp. 622–631; Zendri et al. 2017, pp. 987–1004; Hussain, Akhtar 2017, pp. 71–84; Barone, Ferrara 2018, pp. 163–170; Bianchi et al. 2018, pp. 57–62; Fais et al. 2018, pp. 1–11; Adamopoulos, Rinaudo 2021, pp. 1–32; Gil et al. 2021, pp. 1457–1573; Gupta et al. 2021, pp. 2286–2307; Drobiec 2022, pp. 60–62; Grzyb et al. 2022, pp. 1–16; Krentowski et al. 2023, pp. 1–14; Liu et al. 2023, pp. 90–114; Moazen et al. 2023, pp. 193–208; Said et al. 2023, pp. 108–116; Boccacci et al. 2024, pp. 160–167; Qian et al. 2024, pp. 479–487; Azzi et al. 2025, pp. 1–27; Frąckiewicz et al. 2025, pp. 27–42; Piersigilli et al. 2025, pp. 1–51]. Most of the studies discussed the application of specific methods, highlighting their advantages and disadvantages. Blanca Tejedor and co-authors [2022, pp. 1–22] conducted a bibliometric analysis using statistical and scientific mapping methods covering a two-decade period (2001–2021) and found a significant gap in quantitative research on NDT.

Currently, the most advanced and effective non-destructive method for diagnosing historic structures and capturing their geometry is laser scanning [Arias et al. 2007, pp. 1444–1457; Moropoulou et al. 2013, pp. 1222–1239; Fais et al. 2018, pp. 1–11; Diz-Mellado et al. 2021, pp. 1–17; Krentowski et al. 2023, pp. 1–14], and for identifying the structure of the medium—ultrasound tomography [Martinho, Dionísio 2014, pp. 1–15; Zielińska, Rucka 2018, pp. 1–16] and ground-penetrating radar [Binda et al. 2005, pp. 171–179, 2010, pp. 473–83; Castellaro et al. 2008, pp. 357–366; Pérez-Gracia et al. 2009, pp. 1039–1050; Frąckiewicz et al. 2025, pp. 27–42]. Thermographic methods are also increasingly applied [Avdelidis, Moropoulou 2004, pp. 119–27; Moropoulou et al. 2013, pp. 1222–1239; Diz-Mellado et al. 2021, pp. 1–17; Krentowski et al. 2023, pp. 1–14]. These methods can be used to assess various traditional materials and historic structures, as well as to evaluate conservation techniques such as surface cleaning, stabilization of fragile materials (e.g., consolidation of brick or stone), and the restoration of walls using repair mortars.

The advantage of non-destructive testing is that it can be performed at any stage of a structure's service life without interrupting its operation. Its limitation, however, is the insufficient amount of information obtained when using only a single testing technique. This can be overcome by combining two or more methods. This approach enables the reliable detection of defects and the identification of their possible causes, providing a solid basis for decisions regarding future maintenance and renovation. For example, it is difficult to conduct ground-penetrating radar surveys on rough and curved surfaces, which is why this technique should be integrated with other NDT methods. In turn, sound pulse velocity tests are insufficient to detect the presence of water or moisture

Z kolei badania prędkości impulsu dźwiękowego są niewystarczające do wykrywania obecności wody i wilgoci wewnątrz materiałów murarskich. Dopiero połączenie badań termograficznych i radarowych zapewnia wysoką skuteczność i czułość w identyfikacji obecności wody, określaniu jej rozmieszczenia i monitorowaniu procesu wysychania muru [Binda et al. 2010, s. 473–483]. Tego typu podejście jest preferowane w wielu pracach [Arias et al. 2007, s. 1444–1457; Leucci et al. 2007, s. 222–32; Moropoulou et al. 2013, s. 1222–1239; Pérez-Gracia et al. 2013, s. 40–47; Martinho, Dionísio 2014, s. 1–15; Alexakis et al. 2018, s. 512–526; Wong 2019, s. 14–25; Diz-Mellado et al. 2021, s. 1–17; Zielińska, Rucka 2023, s. 249–261; Solla et al. 2024, s. 1–26; Zybala et al. 2024, s. 1–19]. Obiecującym kierunkiem w diagnostyce obiektów budowlanych jest integracja technik nieinwazyjnych z metodami numerycznymi. Dane uzyskane za pomocą różnych metod nieniszczących umożliwiają kompleksową analizę obiektu. Przykładowo, skanowanie laserowe dostarcza informacji o precyzyjnej geometrii konstrukcji, natomiast badania termowizyjne i radarowe obrazują jej strukturę wewnętrzną. Dane te, wykorzystywane jako warunki brzegowe w metodzie elementów skończonych (MES), umożliwiają wyznaczenie rozkładu naprężeń, wskazanie punktów krytycznych oraz określenie mechanizmów zniszczenia konstrukcji [Diz-Mellado et al. 2021, s. 1–17]. Również techniki uczenia maszynowego mogą być przydatne jako alternatywne narzędzie do przewidywania wytrzymałości na ściskanie konstrukcji murowanych [Mishra et al. 2020, s. 389–403].

W niniejszej pracy przeprowadzono obszerny przegląd literatury dotyczącej metod nieniszczących stosowanych w diagnostyce obiektów zabytkowych. Szczególną uwagę poświęcono nowoczesnym, zaawansowanym technikom badawczym. Krótko omówiono podstawowe metody służące rozpoznaniu struktury i ocenie jakości elementów konstrukcyjnych, identyfikacji ukrytych detali, wad i uszkodzeń, a także wykrywaniu zawilgocenia i innych nieprawidłowości. Przedstawiono również wybrane problemy związane ze stosowaniem technik nieniszczących w obiektach historycznych. Zaproponowano uproszczoną klasyfikację tych metod, wskazując ich podstawowe zalety, wady i ograniczenia, a także możliwości zastosowania.

Klasyfikacja metod nieniszczących

W literaturze przedmiotu można znaleźć różne klasyfikacje metod badań nieniszczących. Leonard Runkiewicz [2019, s. 26–29] podzielił je na metody optyczne, akustyczne, radiologiczne, elektromagnetyczne, laserowe, sklerometryczne i termograficzne. Z kolei w zależności od źródła energii potrzebnego do zainicjowania badania można je sklasyfikować jako mechaniczne, elektromagnetyczne/magnetyczne, elektrochemiczne i spektroskopowe [Wutke, Konopska-Piechurska 2018, s. 1–10]. Jerzy Hoła i Krzysztof Schabowicz [2015, s. 1–7] zaproponowali bardziej szczegółowy podział metod nieniszczących pod kątem oceny różnych parametrów. Z kolei

within masonry materials. Only the combination of thermographic and radar surveys ensures high effectiveness and sensitivity in identifying the presence of water, determining its distribution, and monitoring the drying process of the masonry [Binda et al. 2010, pp. 473–483]. This approach is favored in many studies [Arias et al. 2007, pp. 1444–1457; Leucci et al. 2007, pp. 222–32; Moropoulou et al. 2013, pp. 1222–1239; Pérez-Gracia et al. 2013, pp. 40–47; Martinho, Dionísio 2014, pp. 1–15; Alexakis et al. 2018, pp. 512–526; Wong 2019, pp. 14–25; Diz-Mellado et al. 2021, pp. 1–17; Zielińska, Rucka 2023, pp. 249–261; Solla et al. 2024, pp. 1–26; Zybala et al. 2024, pp. 1–19]. A promising direction in the diagnostics of historical buildings is the integration of non-destructive techniques with numerical methods. Data obtained using various non-destructive methods enables a comprehensive analysis of the structure. For example, laser scanning provides precise geometric information about the structure, while thermal imaging and radar surveys reveal its internal structure. This data, used as boundary conditions in the finite element method (FEM), enables the determination of stress distributions, the identification of critical points, and the identification of structural failure mechanisms [Diz-Mellado et al. 2021, pp. 1–17]. Machine learning techniques can also be useful as an alternative tool for predicting the compressive strength of masonry structures [Mishra et al. 2020, pp. 389–403].

This paper presents a comprehensive review of the literature on non-destructive methods for diagnosing historic buildings. Particular attention is given to modern, advanced testing techniques. The basic methods used to identify the structure and assess the quality of structural elements, to identify hidden details, defects, and damage, and to detect moisture and other abnormalities are briefly discussed. Selected issues related to the application of non-destructive techniques in historic structures were also presented. A simplified classification of these methods was proposed, highlighting their basic advantages, disadvantages, and limitations, as well as their potential applications.

Classification of non-destructive testing methods

Various classifications of non-destructive testing methods can be found in the literature. Leonard Runkiewicz [2019, pp. 26–29] divided them into optical, acoustic, radiographic, electromagnetic, laser, sclerometric, and thermographic methods. Alternatively, depending on the energy source required to initiate the test, they can be classified as mechanical, electromagnetic/magnetic, electrochemical, and spectroscopic [Wutke, Konopska-Piechurska 2018, pp. 1–10]. Jerzy Hoła and Krzysztof Schabowicz [2015, pp. 1–7] proposed a more detailed classification of non-destructive methods based on the evalu-

Edite Martinho i Amelia Dionísio [2014, s. 1–15] sklasyfikowały te metody pod względem możliwości ich zastosowania, wyróżniając techniki: stosowalne, o ograniczonej stosowalności oraz nie do zastosowania.

Autor niniejszej pracy zaproponował uproszczoną klasyfikację współczesnych metod nieniszczących stosowanych w diagnostyce obiektów zabytkowych (tab. 1). W tabeli przedstawiono również podstawowe zalety, wady i ograniczenia poszczególnych technik. Nie uwzględniono jednak szeregu znanych metod, w przypadku których błąd oszacowania jest bardzo duży, a uzyskiwane wyniki wymagają dodatkowej weryfikacji innymi sposobami. Pominięto również metody chemiczne i biologiczne, angażujące specjalistów z innych dziedzin, a także standardowe techniki, takie jak badania dynamiczne czy najnowsze rozwiązania technologiczne, nie w pełni zweryfikowane, np. magnetyczny rezonans jądrowy (ang. nuclear magnetic resonance – NMR [Capitani et al. 2012, s. 29–69; Baías, Blümich 2018, s. 293–304]).

Charakterystyka metod nieniszczących

Metody optyczne

Współczesne metody optyczne stosowane w diagnostyce zabytków polegają na bezinwazyjnym obrazowaniu i pomiarze struktury obiektu przy użyciu wiązki światła. Do najważniejszych z nich należą fotogrametria i skanowanie laserowe.

Fotogrametria polega na odtwarzaniu trójwymiarowych kształtów i wymiarów obiektu na podstawie serii nakładających się zdjęć, co umożliwia wygenerowanie precyzyjnego modelu cyfrowego 3D. Badania prowadzone są przy użyciu kamer lub cyfrowych aparatów fotograficznych.

Naziemne skanowanie laserowe (ang. terrestrial laser scanning – TLS) to technika wykorzystująca wiązkę laserową do pomiaru odległości pomiędzy urządzeniem a obiektem. Skanery mogą pozyskiwać dane z odległości sięgającej 300 m z dokładnością do 1 mm. Wyniki mają postać cyfrowej chmury punktów. Każdemu punktowi przypisane są trzy współrzędne przestrzenne oraz czwarta – opisująca intensywność sygnału odbitego od powierzchni mierzonego elementu.

Bardzo użytecznymi, nieinwazyjnymi technikami współczesnej diagnostyki zabytków są mikroskopia elektronowa oraz mikroskopia światłowodowa. Pierwsza z nich polega na obrazowaniu struktury materiału za pomocą wiązki elektronów zamiast światła. Mikroskopia światłowodowa z kolei to technika, w której tradycyjny układ soczewek mikroskopu jest zastąpiony wąską wiązką elastycznych światłowodów. W miejscach trudno dostępnych, a często również wewnątrz struktury obiektu, efektywne wyniki uzyskuje się, wprowadzając kamery endoskopowe w szczeliny i pustki konstrukcyjne.

Skanowanie naziemne oraz fotogrametria są wykorzystywane przede wszystkim do diagnostyki powierzchni elementów konstrukcyjnych. Służą one do inwentaryzacji 3D, analizy deformacji, dokumentacji stanu zachowania oraz archiwizacji. Mikroskopia elektronowa w kontekście

ation of various parameters. In turn, Edite Martinho and Amelia Dionísio [2014, pp. 1–15] classified these methods by their applicability, distinguishing among techniques that are applicable, of limited applicability, and inapplicable.

The author of this paper has proposed a simplified classification of modern non-destructive methods used for diagnosing historic structures (Table 1). The table also outlines the main advantages, disadvantages, and limitations of each technique. However, a number of well-known methods were not included, as they have a very high margin of error, and the results obtained require additional verification using other methods. Also omitted are chemical and biological methods (which involve specialists from other fields), standard techniques such as dynamic testing, and the latest technological solutions not yet fully verified, e.g., nuclear magnetic resonance (NMR) [Capitani et al. 2012, pp. 29–69; Baías, Blümich 2018, pp. 293–304].

Characteristics of non-destructive testing methods

Optical methods

Modern optical methods used in the diagnosis of historical monuments involve non-destructive imaging and measurement of a structure's structure using a light beam. The most important of these include photogrammetry and laser scanning.

Photogrammetry involves reconstructing the three-dimensional shape and dimensions of an object from a series of overlapping images, enabling the generation of a precise 3D digital model. The research is conducted using video or digital cameras.

Terrestrial laser scanning (TLS) is a technique that uses a laser beam to measure the distance between the device and the object. Scanners can collect data from distances of up to 300 m with an accuracy of 1 mm. The results are presented as a digital point cloud. Each point is assigned three spatial coordinates and a fourth coordinate describing the intensity of the signal reflected from the surface of the measured object.

Electron microscopy and fiber-optic microscopy are highly useful, non-destructive techniques in the modern diagnostics of historical monuments. The former relies on imaging the material's structure using an electron beam instead of light. Fiber-optic microscopy, on the other hand, is a technique in which the traditional microscope lens system is replaced by a narrow bundle of flexible optical fibers. In certain areas, and often within an object's internal structure, endoscopic cameras are inserted into fissures and structural voids.

Laser scanning and photogrammetry are primarily used for the surface diagnostics of structural elements. They are employed for 3D inventory, deformation analysis, documentation and digital

Metoda	Technika	Zalety	Wady	Ograniczenia
Optyczna	Skaning Laserowy	Wysoka precyzja, kompletność danych, baza dla projektów konserwatorskich i modeli HBIM	Wysoki koszt sprzętu i oprogramowania, duże pliki danych, czasochłonna obróbka	Martwe pola, ciemne lub lustrzane powierzchnie, wrażliwość na warunki atmosferyczne
	Fotogrametria	Duża dokładność, jednoczesna informacja o geometrii i teksturze, niski koszt sprzętu, mobilność i duży zasięg	Pracochłonność, ryzyko błędów, zarządzanie ogromną ilością danych	Zależność od oświetlenia i tekstury powierzchni, brak skali rzeczywistej
	Mikroskopia cyfrowa	Wysoka rozdzielczość obrazów powierzchni, cyfrowa dokumentacja i analiza obrazów	Wysoki koszt, zależność od zasilania, mała mobilność, ryzyko uszkodzenia	Ograniczony obszar obserwacji, wpływ oświetlenia i odbłasków, płytka głębia ostrości
	Sklerometria cyfrowa	Mobilność, niski koszt, natychmiastowa cyfrowa dokumentacja	Wrażliwość na stan powierzchni, trudna interpretacja wyników, pracochłonność	Płytki zasięg badania, wpływ karbonatyzacji, niejednorodność i wilgotność materiału
Akustyczna	Tomografia soniczna	Obrazowanie wnętrza, głęboka penetracja, ocena parametrów mechanicznych	Wysoka pracochłonność i koszt, podatność na zakłócenia zewnętrzne	Konieczność dostępu z wielu stron, ośrodki porowate, wrażliwość na wilgoć
	Echo uderzeniowe	Dostęp jednostronny, precyzja w wykrywaniu rozwarstwień i pustek	Wrażliwość na hałas otoczenia, punktowy charakter pomiarów	Wpływ niejednorodności, wilgoci i zasolenia, ograniczenia geometryczne
	Emisja akustyczna	Wykrywanie procesów dynamicznych i aktywności biologicznej, stały monitoring, wczesne ostrzeżenie	Niewykrywalność wad stabilnych, trudna interpretacja danych	Ekstremalna wrażliwość na hałas zewnętrzny, tłumienie i niejednorodność ośrodka
	Tomografia ultradźwiękowa	Dokładna ocena wnętrza materiału, precyzyjne wykrywanie pustek i wad, czytelne mapy 3D, badanie jednostronne, wysoka rozdzielczość	Wrażliwość na jakość styku, skomplikowana interpretacja danych, wysoki koszt aparatury	Trudności w badaniu porowatych, grubych lub złożonych struktur, bariera nieciągłości, ograniczona penetracja
Elektromagnetyczna	Georadar	Możliwość obrazowania struktury wewnętrznej i ukrytych elementów, wysoka rozdzielczość, praca w czasie rzeczywistym, znaczna mobilność i tempo pomiarów	Bardzo trudna interpretacja danych, konieczność zachowania ciągłego kontaktu	Martwe strefy pomiarowe, wpływ wilgoć i zasolenie, podłoże gliniaste, rozdzielczość zależna od częstotliwości fal
	Radiografia	Bezpośrednie obrazowanie wnętrza, wysoka rozdzielczość, obiektywność wyników	Ryzyko promieniowania, ograniczenia logistyczne i gabarytowe obiektu, wysoki koszt	Bariera grubości i gęstości materiału, konieczność dostępu dwustronnego
	Termowizja	Szybkie wykrywanie mostków termicznych, wilgoci czy nieszczelności, możliwość badań z większej odległości	Zależność od warunków atmosferycznych i otoczenia, konieczność precyzyjnej kalibracji	Refleksyjność i odbicia promieni ciepłych, ograniczona penetracja, niestabilność obrazu
Elektryczna	Tomografia elektrooporowa	Głębokie obrazowanie 3D, precyzyjne wykrywanie zawilgocenia i zasolenia, wysoki kontrast dla materiałów o różnej oporności	Wymaga kontaktu elektrod z materiałem, wrażliwość na warunki atmosferyczne, czasochłonność	Zależność od rodzaju i przewodności materiału oraz temperatury, drastyczny spadek rozdzielczości wraz z głębokością
	Potencjał własny	Wykrywanie aktywnej korozji oraz reakcji zachodzących w materiale, krótki czas pomiaru	Wrażliwość na zakłócenia środowiskowe, czasochłonność, wpływ zmian zasolenia i zawilgocenia	Zależność czułości od przewodności i temperatury, ograniczenie do procesów dynamicznych

Tab. 1. Podział i charakterystyka współczesnych metod nieniszczących w diagnostyce obiektów zabytkowych

Method	Technique	Advantages	Disadvantages	Limitations
Optical	Laser scanning	High precision; comprehensive data acquisition; foundation for conservation projects and HBIM models	High cost of hardware and software; large data files; time-consuming processing	Blind spots; dark or highly reflective surfaces; sensitivity to weather conditions
	Photogrammetry	High accuracy; simultaneous information on geometry and texture; low equipment cost; mobility; wide coverage	Labor-intensiveness; risk of error; managing substantial volumes of data	Dependence on lighting and surface texture; lack of true scale
	Digital microscopy	High-resolution surface imaging; digital documentation and image analysis	High cost; dependence on power supply; limited mobility, risk of damage to the object	Limited field of view; sensitivity to lighting conditions and glare; shallow depth of field
	Digital sclerometry	Mobility; low cost; instant digital documentation	Sensitivity to surface condition; difficult in interpretation of results; high labor intensity	Shallow testing depth; influence of carbonation; heterogeneity and moisture content of the material
Acoustic	Sonic tomography	Internal imaging; deep penetration; evaluation of mechanical parameters	High labor intensity and cost; susceptibility to external interference	Requirement for multi-sided access; porous media; sensitivity to moisture
	Impact-echo	Single-sided access; precision in detecting delaminations and voids	Sensitivity to ambient noise; point-by-point measurements	Influence of heterogeneity; moisture and salinity; geometric limitations
	Acoustic emission	Detection of dynamic processes and biological activity; continuous early warning monitoring	Inability to detect stable defects; difficult data interpretation	Extreme sensitivity to external noise; attenuation and heterogeneity of the medium
	Ultrasonic tomography	Accurate assessment of the material interior; precise detection of voids and defects; clear 3D maps; single-sided testing; high resolution	Sensitivity to contact quality; complex data interpretation; high cost of equipment	Difficulties in testing porous, thick or complex structures; discontinuity barrier; limited penetration
Electromagnetic	Ground-penetrating radar	Capability of imaging the internal structures and hidden elements; high resolution; real-time operation; significant mobility; rapid measurement speed	Highly difficult data interpretation; necessity of maintaining continuous contact	Measurement of dead zones; influence of moisture and salinity; clayey soils, dependent on wave frequency
	Radiographic testing	Direct internal imaging; high resolution; objectivity of results	Radiation hazard, logistical and size limitations; high cost of equipment	Material thickness and density barrier; requirement of double-sided access
	Infrared thermography	Rapid detection of thermal bridges, moisture or leaks; possibility of testing from a great distance	Dependence on weather and environmental conditions; necessity of precise calibration	Reflectivity and thermal radiation reflections; limited penetration; image instability
Electric	Electrical resistivity tomography	Deep 3D imaging; precise detection of moisture and salinity; high contrast for materials with different electrical resistivity	Requires electrode-material contact; sensitivity to weather conditions; time-consuming nature	Dependence on material type; conductivity and temperature; drastic decrease in resolution with depth
	Self-potential	Detection of active corrosion and chemical reactions occurring within the material; short measurement time	Sensitivity to environmental inference; time-influence of variations in salinity and moisture	Dependence of sensitivity on conductivity and temperature; restricted to dynamic processes

Table 1. Classification and characteristics of contemporary non-destructive methods in the diagnosis of historic structures

diagnostyki dziedzictwa architektonicznego jest stosowana głównie do badań próbek materiałów budowlanych, co umożliwia dobór odpowiednich środków konserwatorskich, zgodnych z oryginalną materią zabytku. Techniki światłowodowe wykorzystuje się do monitorowania pęknięć murów oraz przemieszczeń i osiadania konstrukcji w czasie rzeczywistym. Z kolei kamery endoskopowe służą do inspekcji wewnątrz obiektów.

Metody akustyczne

Metody akustyczne bazują na generacji i rozprzestrzenianiu się w sprężystym ośrodku fal dźwiękowych (akustycznych). Ponieważ fale w różnych ośrodkach poruszają się z różną prędkością, możliwe jest określenie rozkładu prędkości, a w konsekwencji charakterystyki warstw podpowierzchniowych, takich jak grubość, położenie przewarstwień, właściwości fizyczne czy stan spękań. W diagnostyce zabytków wykorzystuje się głównie tomografię soniczną, metodę echa uderzeniowego, emisję akustyczną i tomografię ultradźwiękową.

Tomografia soniczna (ang. sonic tomography – ST) wykorzystuje korelację między prędkością propagacji słyszalnych fal dźwiękowych (poniżej 20 kHz) przez badany obiekt a właściwościami ośrodka. W zależności od gęstości materiału oraz jego stałych sprężystości prędkość rozchodzenia fal zmienia się, a w trakcie przechodzenia przez ośrodek następuje tłumienie i utrata energii. Wady strukturalne materiału identyfikuje się na podstawie pomiarów prędkości fal odbitych od napotkanych nieciągłości.

Metoda echa uderzeniowego (ang. impact-echo – IE) polega na wzbudzeniu fal mechanicznych o nieco wyższej częstotliwości poprzez uderzenie w powierzchnię konstrukcji.

W metodzie emisji akustycznej (ang. acoustic emission – AE/AT) wykorzystuje się zjawisko uwalniania z akumulowanej w materiale energii sprężystej w wyniku narastającego obciążenia statycznego lub dynamicznego. Energia ta rozprzestrzenia się w postaci fal o wysokiej częstotliwości (20 kHz – 1 GHz).

Jedną z bardziej zaawansowanych metod obrazowania, coraz powszechniej stosowaną w diagnostyce zabytków, jest tomografia ultradźwiękowa (ang. ultrasonic tomography – UST). Polega ona na wielokrotnym „prześwietlaniu” elementu falami ultradźwiękowymi, co umożliwia komputerowo wygenerować przestrzenny model jego struktury wewnętrznej. Metoda ta jest bardziej efektywna niż wcześniej opisane techniki. W praktyce stosuje się dwie główne techniki ultradźwiękowe: metodę echa oraz metodę przepuszczania. Pierwsza wykorzystuje zjawisko odbicia fali przechodzącej przez jeden ośrodek od granicy z drugim. W metodzie przepuszczania falę generuje się z jednej strony elementu, a rejestruje po stronie przeciwnej.

Najważniejszym zastosowaniem metody emisji akustycznej w diagnostyce murów jest monitoring pęknięć, czyli ocena, czy rysy są aktywne. W konstrukcjach drewnianych metoda ta umożliwia lokalizację stref aktywności biologicznej, np. żerowania owadów. Tomografia

archiving. In the context of the diagnostics of architectural heritage, electron microscopy is mainly used to examine building-material samples, enabling the selection of appropriate conservation treatments compatible with the original material of the historic structure. Fiber-optic techniques are used to monitor cracks in walls as well as structural displacements and settlement in real time. Endoscopic cameras, on the other hand, are used to inspect the interiors of structures.

Acoustic methods

Acoustic methods are based on the generation and propagation of sound (acoustic) waves in an elastic medium. Since waves travel at different speeds in different media, it is possible to determine the velocity distribution and, consequently, the characteristics of subsurface layers, such as thickness, the location of stratifications, physical properties, or the state of cracking. The diagnostics of historical monuments primarily utilize sonic tomography, the impact-echo method, acoustic emission, and ultrasonic tomography.

Sonic tomography (ST) relies on the correlation between the propagation velocity of sonic waves (below 20 kHz) through the tested object and the properties of the medium. Depending on the material's density and elastic properties, the wave propagation velocity varies, and attenuation and energy loss occur as the waves pass through the medium. Structural defects in the material are identified based on measurements of the wave speeds reflected from encountered discontinuities.

The impact-echo (IE) method involves generating mechanical waves of slightly higher frequency by striking the structure's surface.

The acoustic emission (AE/AT) method utilizes the phenomenon of elastic energy accumulated in a material being released under increasing static or dynamic loading. This energy propagates as high-frequency waves (20 kHz–1 GHz).

One of the more advanced imaging methods, increasingly used in the diagnosis of historical monuments, is ultrasonic tomography (UST). It involves multiple ultrasonic scans of a structure's elements, enabling the computer to generate a three-dimensional model of their internal structure. This method is more effective than the techniques described earlier. In practice, two main ultrasonic techniques are used: the impact-echo method and the transmission method. The first utilizes the phenomenon of a wave reflecting as it passes through one medium at the boundary with another. In the transmission method, the wave is generated on one side of the object and recorded on the opposite side.

The most important application of the acoustic emission method in masonry diagnostics is crack monitoring, which involves assessing whether cracks are active. In wooden structures, this method allows

soniczna służy do badania ogólnej jednorodności materiału i wykrywania znacznych anomalii morfologicznych i pustek w masywnych strukturach. Tomografia ultradźwiękowa pozwala na bardziej precyzyjne obrazowanie wnętrza obiektu oraz ocenę jego integralności materiałowej. Metoda echa (jednostronna) jest stosowana do pomiaru grubości i wykrywania odwarstwień, natomiast metoda przepuszczania (dwustronna) służy do całościowej oceny ciągłości strukturalnej materiału.

Metody elektromagnetyczne

Metody elektromagnetyczne polegają na pomiarze przewodności ośrodka poprzez wzbudzenie w nim pola elektromagnetycznego, powstającego w wyniku wzajemnego oddziaływania energii elektrycznej i magnetycznej. Podczas rozchodzenia się fali elektromagnetycznej, w zależności od właściwości badanego ośrodka, część energii jest tracona. Różnice w poziomie strat energetycznych umożliwiają określenie właściwości badanego materiału. Wśród metod elektromagnetycznych stosuje się przede wszystkim techniki termograficzne i radiograficzne, a ostatnio szybko rozwijające się techniki georadarowe.

Termografia w podczerwieni (ang. infrared thermography – IT) opiera się na zjawisku, że powyżej zerowej temperatury absolutnej wszystkie materiały emitują promieniowanie podczerwone. Dowolna cecha lub anomalia, zarówno wewnątrz, jak i na powierzchni, wpływa na prędkość, z jaką ciepło przepływa przez strukturę. Cechy te mogą być spowodowane spękaniami, rozwarstwieniami, słabym wiązaniem w murze, zawilgoceniem, deterioracją drewna czy uszkodzeniem powierzchni. Badając strumień ciepła, zamienia się promieniowanie na widzialny obraz (termogram), który przedstawia rozkład temperatury na powierzchni badanego elementu. Na podstawie pomiaru temperatury powierzchni można zatem zlokalizować cechy podpowierzchniowe lub niewidoczne na zewnątrz i powiązać je ze zmianami właściwości materiałów. Zmiany termiczne koreluje się ze zmianami właściwości materiałów, mikrostruktury i morfologii powierzchni. Do badania rzeczywistych wartości oddziaływań termicznych stosowane są głównie kamery termowizyjne. Umożliwiają one analizę zarówno dobowych amplitud temperatury otoczenia, jak i tempa wzrostu temperatury ściany po nocnym chłodzeniu. Wyróżnia się termografię pasywną oraz aktywną. Ta pierwsza wykorzystuje naturalne różnice temperatur wynikające z warunków otoczenia, druga z kolei polega na wymuszeniu przepływu ciepła przy użyciu zewnętrznego źródła energii. W interpretacji wyników uzyskanych w badaniach IRT uwzględnia się właściwości fizyczne materiału, takie jak porowatość czy masa objętościowa, a także parametry spektralne, takie jak emisyjność (absorpcja, odbicie i transmisja) i przewodność (dyfuzyjność, ciepło właściwe).

W metodach radiograficznych wykorzystuje się promieniowanie elektromagnetyczne o wysokiej częstotliwości: rentgenowskie, gamma, a coraz częściej również neutronowe. Należą one do najbardziej wiarygodnych

for the localization of areas of biological activity, such as insect feeding. Sonic tomography is used to examine the overall homogeneity of the material and to detect significant morphological anomalies and voids in massive structures. Ultrasonic tomography enables more precise imaging of a structure's interior and assessment of its material integrity. The impact-echo (single-sided) method is applied for thickness measurement and delamination detection. In contrast, the transmission (double-sided) method is used for a comprehensive assessment of the material's structural continuity.

Electromagnetic methods

Electromagnetic methods rely on measuring a medium's conductivity by inducing an electromagnetic field within it, which arises from the interaction between electric and magnetic fields. During electromagnetic wave propagation, depending on the properties of the investigated medium, some energy is lost. Differences in energy loss levels allow the determination of the properties of the material being tested. Among electromagnetic methods, thermographic and radiographic techniques are primarily applied, along with rapidly developing ground-penetration radar techniques.

Infrared thermography (IT) is based on the principle that all materials emit infrared radiation above absolute zero. Any feature or anomaly, whether internal or on the surface, affects the rate at which heat flows through the structure. These features may be caused by cracks, delamination, poor bonding in masonry, moisture, wood deterioration, or surface damage. By analyzing the heat flux, the radiation is converted into a visible image (thermogram) that displays the temperature distribution on the surface of the tested element. Based on surface temperature measurements, it is therefore possible to locate subsurface or otherwise invisible features and correlate them with changes in material properties. Thermal variations are linked to alterations in material properties, microstructure, and surface morphology. To investigate the actual values of thermal effects, thermal imaging cameras are primarily used. They enable the analysis of both daily ambient temperature fluctuations and the rate of wall temperature rise following nighttime cooling. A distinction is made between passive and active thermography. The former utilizes natural temperature differences resulting from environmental conditions, while the latter involves inducing a heat flow using an external energy source. The interpretation of IRT test results takes into account the material's physical properties, such as porosity and bulk density, as well as spectral parameters, such as emissivity (absorption, reflection, and transmission) and thermal conductivity (diffusivity and specific heat).

Radiographic methods utilize high-frequency electromagnetic radiation, namely X-ray and gamma,

technik badań nieniszczących. Jedną z najnowocześniejszych jest rentgenowska tomografia komputerowa (ang. X-ray computer tomography – XCT), znana z zastosowań medycznych, która umożliwia uzyskanie szczegółowych obrazów warstwowych badanego obiektu. Polega ona na pomiarze pochłaniania lub rozpraszania promieniowania przechodzącego przez badany element, co zależy od wewnętrznego zróżnicowania jego struktury i grubości. Ograniczeniem tej metody jest uzyskiwanie dwuwymiarowych obrazów, ponieważ promieniowanie przebiega tylko w jednym kierunku. Co prawda można przepuszczać promienie z innych kierunków, jednak pod warunkiem, że te strony badanego elementu są dostępne.

Metoda georadarowa (ang. ground penetrating radar – GPR) działa na zasadzie rejestracji energii odbicia przesyłanego krótkiego impulsu energii elektromagnetycznej (fal radarowych), o częstotliwości zazwyczaj mieszczącej się w zakresie 100 MHz – 2,3 GHz. Jest to wysokorozdzielcza technologia, pozwalająca na uzyskanie obrazu struktur podpowierzchniowych w dowolnym materiale.

Termografia w podczerwieni wykorzystywana jest głównie do wykrywania anomalii termicznych oraz problemów związanych z zawilgoceniem. Termografię pasywną stosuje się w badaniach jakościowych dużych powierzchni, takich jak mury (wykrywanie nieciągłości, defektów, pustych przestrzeni). Termografia aktywna jest wykorzystywana w analizie mniejszych obszarów, szczególnie gdy badane cechy znajdują się w równowadze termicznej z otoczeniem. Metody radiograficzne umożliwiają precyzyjne obrazowanie wnętrza elementów konstrukcyjnych, co pozwala na wykrycie ukrytych wad, takich jak pęknięcia czy ubytki. Technika georadarowa służy do rozpoznania i mapowania wewnętrznej struktury i wad konstrukcyjnych. Umożliwia precyzyjne określenie grubości elementu, lokalizację przewarstwień i ubytków. Pozwala też na wykrycie wilgoci czy zasolenia ale w sposób pośredni, mniej precyzyjny niż metody elektryczne.

Metody elektryczne

Metody elektryczne polegają na pomiarze oporności prądu stałego przepływającego przez badany ośrodek. Wyróżnia się wśród nich dwie podstawowe techniki – tomografię elektrooporową i metodę potencjału własnego. Tomografia elektrooporowa (ang. electric resistivity tomography – ERT) pozwala uzyskać obrazy podpowierzchniowych struktur ośrodka na podstawie pomiarów elektrycznych wykonywanych na powierzchni. Jest to stosunkowo nowa metoda nieniszcząca, wzbudzająca coraz większe zainteresowanie z uwagi na szerokie możliwości jej stosowanie. Skuteczna, choć niestety niezbyt często wykorzystywana w ochronie dziedzictwa architektonicznego, jest metoda potencjału własnego (ang. self-potential – SP). Polega ona na pomiarze naturalnych różnic potencjałów elektrycznych pomiędzy dwoma dowolnymi punktami na powierzchni badanego obiektu.

Metody elektryczne stosuje się przede wszystkim do identyfikacji stref zawilgocenia oraz miejsc o wysokim zasoleniu. Niekiedy umożliwiają one także ustalenie stanu degradacji elementów konstrukcyjnych.

and, increasingly, neutron radiation. They are among the most reliable non-destructive testing techniques. One of the most advanced is X-ray computed tomography (X-ray CT–XCT), well-known in medical applications, which enables the acquisition of detailed cross-sectional images of the object under examination. It involves measuring the absorption or scattering of radiation passing through the element under examination, which depends on internal variations in its structure and thickness. A limitation of this method is that it produces two-dimensional images, as the radiation propagates along a single path. Although rays can be directed from other angles, it is only possible provided that the sides of the examined element are accessible.

The ground-penetrating radar (GPR) method works by recording the reflected energy from a short transmitted pulse of electromagnetic energy (radar waves), typically at frequencies ranging from 100 MHz to 2.3 GHz. This is a high-resolution technology that enables imaging of subsurface structures in any material.

Infrared thermography is mainly used to detect thermal anomalies and moisture-related issues. Passive thermography is used in qualitative inspections of large areas, such as walls (detecting discontinuities, defects, and voids). Active thermography is used to analyze smaller areas, especially when the features under investigation are in thermal equilibrium with their surroundings. Radiographic methods enable precise imaging of the interiors of structural elements, allowing detection of hidden defects, such as cracks or voids. The ground-penetrating radar technique is used to identify and map internal structures and structural defects. It enables precise determination of an element's thickness, as well as the location of layers and voids. It also indirectly detects moisture or salinity, which is less precise than electrical methods.

Electrical methods

Electrical methods involve measuring the resistance of a direct current flowing through the medium under investigation. There are two primary techniques: electrical resistivity tomography and the self-potential method. Electrical resistivity tomography (ERT) enables the imaging of subsurface structures from electrical measurements at the surface. It is a relatively new, non-destructive method that is attracting increasing interest due to its wide range of applications. The self-potential method (SP) is effective, though unfortunately not often used in the preservation of architectural heritage. It involves measuring natural differences in electrical potential between any two points on the surface of the object being examined.

Electrical methods are primarily used to identify areas of moisture and locations with high salinity. In some cases, they also allow for the determination of the state of degradation of structural elements.

Wykorzystanie współczesnych metod nieniszczących w diagnostyce obiektów zabytkowych wymaga nie tylko doskonałej znajomości dostępnych technik i ich ograniczeń, lecz również, a może przede wszystkim, bogatego doświadczenia praktycznego. W przeciwnym razie interpretacja otrzymanych wyników badań może skutkować kosztownymi decyzjami w zakresie rozwiązań naprawczych lub wzmacniających. Metod tych nie można zatem stosować bezkrytycznie. Przykładowo, zastosowanie georadaru staje się bezużyteczne, gdy ośrodek jest nasycony wodą, zwłaszcza słoną. Zwiększa się wówczas przewodność elektryczna, a penetracja fal ulega drastycznemu zmniejszeniu. Właściwości fizyczne i mechaniczne określane metodami nieniszczącymi często należy traktować jako raczej jakościowe, a nie ilościowe.

Wydaje się, że najbardziej wszechstronnym, przydatnym narzędziem, dostarczającym najwięcej parametrów technicznych dla obiektów zabytkowych, jest tomografia ultradźwiękowa (dynamiczny moduł sprężystości, jednorodność i gęstość materiału). Niezbędna jest jednak właściwa interpretacja otrzymywanych wyników, co często wiąże się z koniecznością opracowania bardziej efektywnego, odpowiedniego dla NDT oprogramowania. Skanowanie laserowe to optymalne rozwiązanie do określania geometrii obiektu i inwentaryzacji zabytków, szczególnie pod kątem celów konstrukcyjnych. Z kolei fotogrametria jest lepsza do diagnozowania stanu zachowania powierzchni lub tworzenia modelu 3D do prezentacji. W przypadku konstrukcji murowanych najskuteczniejszą techniką do badania wnętrza elementu są georadar oraz tomografia soniczna i ultradźwiękowa. Dla konstrukcji drewnianych skuteczne w wykrywaniu zgnilizny i ubytków skuteczne są ultradźwięki, a do lokalizacji zawilgoceń i miejsc żerowania owadów – termowizja. W wielu przypadkach istotne korzyści przynosi integracja technik nieinwazyjnych z metodami numerycznymi, np. MES. Metody elektryczne są raczej rzadko stosowane do oceny stanu zachowania obiektów zabytkowych. Pomimo ich znacznego potencjału diagnostycznego wykorzystywane są głównie do określenia rozkładu wilgoci. Warto też podkreślić, że konieczne jest bardziej efektywne opracowanie odpowiedniego oprogramowania dla NDT, umożliwiające wiarygodniejszą interpretację otrzymywanych wyników. Takie zaawansowane oprogramowanie jest kluczowe, aby zastąpić subiektywną interpretację wyników obiektywną cyfrową diagnozą stanu technicznego zabytku.

The use of modern non-destructive testing methods in the diagnosis of historic structures requires not only a thorough understanding of the available techniques and their limitations, but also, and perhaps most importantly, extensive practical experience. Otherwise, the interpretation of the test results obtained may lead to costly decisions regarding repair or strengthening solutions. Therefore, these methods cannot be applied uncritically. For instance, ground-penetrating radar becomes ineffective when the medium is saturated with water, particularly saline water. In such cases, electrical conductivity increases, and wave penetration is drastically reduced. Physical and mechanical properties determined by non-destructive methods should often be treated as qualitative rather than quantitative ones.

It appears that ultrasonic tomography is the most versatile and useful tool, providing the greatest number of technical parameters for diagnosing historical structures (dynamic elastic modulus, material homogeneity, density). However, proper interpretation of the results obtained is essential and often requires developing appropriate software for NDT. Laser scanning represents an optimal solution for determining object geometry and surveying historical monuments, particularly for structural purposes. On the other hand, photogrammetry is better suited for diagnosing surface presentation status or creating a 3D model for presentation of this survey. In the case of masonry structures, ground-penetrating radar, as well as sonic and ultrasonic tomography, are the most effective techniques for examining the interior of an element. For wooden structures, ultrasound is effective for detecting rot and other defects, while thermography is used to locate moisture and insect feeding sites. In many cases, significant benefits are brought by integrating non-destructive techniques with numerical methods, such as FEM. Electrical methods are rarely used to assess the preservation status of historical structures. Despite their significant diagnostic potential, they are mainly utilized to determine moisture distribution. It is also worth emphasizing the need to develop more reliable software for NDT, thereby enabling a more credible interpretation of the results obtained. Such advanced software is crucial for replacing subjective interpretation with an objective, digital diagnosis of the technical condition.

Bibliografia / References

Opracowania / Secondary sources

Abu-Zeid Nasser, Botteon Daniele, Cocco Giovanni, Santarato Giovanni, *Non-invasive characterization of ancient foundations in Venice using the electrical resistivity imaging technique*, „NDT & E International” 2006, t. 39 (1).

Adamopoulos Efstathios, Rinaudo Fulvio, *Close-Range Sensing and Data Fusion for Built Heritage Inspection and Monitoring – A Review*, „Remote Sensing” 2021, t. 13, 3936.

Alexakis Emmanouil, Delegou Ekaterini, Lampropoulos Kyriakos, Apostolopoulou Mairi, Ntoutsis Ioanna,

- Moropoulou Antonia, *NDT as a monitoring tool of the works progress and the assessment of materials and rehabilitation interventions at the Holy Aedicule of the Holy Sepulchre*, „Construction and Building Materials” 2018, t. 20.
- Arias Pedro, Armesto Julia, Di-Capua Daniel, González-Drigo Ramon, Lorenzo Henrique, Pérez-Gracia Vega, *Digital photogrammetry, GPR and computational analysis of structural damages in a medieval bridge*, „Engineering Failure Analysis” 2007, t. 14 (8).
- Avdelidis Nicolas, Moropoulou Antonia, *Applications of infrared thermography for the investigation of historic structures*, „Journal of Cultural Heritage” 2004, t. 5 (1).
- Azzi Ziad, Sayegh Houssam, Metwally Omar, Mohamed Eissa, *Review of Nondestructive Testing (NDT) Techniques for Timber Structures*, „Infrastructures” 2025, t. 10 (28).
- Baias Maria, Blümich Bernhard, *Nondestructive testing of objects from cultural heritage with NMR*, [w:] *Modern Magnetic Resonance*, red. Web Graham A., wyd. 2, Cham 2018.
- Barone Pier M., Ferrara Carlotta, *Non-Invasive Moisture Detection for the Preservation of Cultural Heritage*, „Heritage” 2018, t. 1 (1).
- Bianchi Maria, Casula Giuseppe, Cuccuru Francesco, Fais Silvana, Ligas Paola, Ferrara Concetta, *Three-dimensional imaging from laser scanner, photogrammetric and acoustic non-destructive techniques in the characterization of stone building materials*, „Advances in Geosciences” 2018, t. 45.
- Binda Luigia, Cardani Giuliana, Zanzi Luigi, *Non-destructive testing evaluation of drying process in flooded full-scale masonry walls*, „Journal of Performance of Constructed Facilities” 2010, t. 24 (5).
- Binda Luigia, Zanzi Luigi, Lualdi Maurisio, Condoleo Paola, *The use of georadar to assess damage to a masonry Bell Tower in Cremona, Italy*, „NDT & E International” 2005, t. 38.
- Boccacci Giulia, Frasca Francesca, Bertolin Chiara, Siani Anna, *Diagnosis of Historic Reinforced Concrete Buildings: A Literature Review of Non-Destructive Testing (NDT) Techniques*, „Procedia Structural Integrity” 2024, t. 55.
- Castellaro Silvia, Imposa Sebastiano, Barone Francesco, Chiavetta Fernando, Gresta Stefano, Mulargia Francesco, *Georadar and passive seismic survey in the roman amphitheatre of Catania (Sicily)*, „Journal of Cultural Heritage” 2008, t. 9 (4).
- Capitani Donatell, Di Tullio Valeria, Proietti Noemi, *Nuclear magnetic resonance to characterize and monitor cultural heritage*, „Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy” 2012, t. 64.
- Chang Li-Hong, Chang Xiao-Hong, Chang Hao, Qian Wei, Cheng Li-Ting, *The predictive research of ancient wooden building internal defects compressive*, „Mechanics of Advanced Materials and Structures” 2021, t. 28 (3).
- Diz-Mellado Eduardo, Mascort-Albea Emilio, Romero-Hernandez Rocío, Galan-Marín Carmen, Rivera-Gomez Carlos, Ruiz-Jaramillo Jonathan, Jaramillo-Morilla Antonio, *Non-destructive testing and Finite Element Method integrated procedure for heritage diagnosis: The Seville Cathedral case study*, „Journal of Building Engineering” 2021, t. 37, 102134.
- Drobiec Łukasz, *Badania murów zamku w Będzinie z użyciem tomografii ultradźwiękowej*, „Materiały Budowlane” 2022, t. 6.
- El Masri Yasser, Rakha Tarek, *A scoping review of non-destructive testing (NDT) techniques in building performance diagnostic inspections*, „Construction and Building Materials” 2020, t. 265 (30), 120542.
- Fais Silvana, Casula Giuseppe, Cuccuru Francesco, Ligas Paola, Bianchi Maria, *An innovative methodology for the non-destructive diagnosis of architectural elements of ancient historical buildings*, „Scientific Reports” 2018, t. 8, 4334.
- Frąckiewicz Piotr, Raszczuk Krzysztof, Jasieńko Jerzy, *Obszary zastosowań georadaru w diagnostyce historycznych konstrukcji murowych*, „Wiadomości Konserwatorskie – Journal of Heritage Conservation” 2025, nr 81.
- Gil Enrique, Mas Ángeles, Lerma Carlos, Torner Eugenia, Vercher Jose, *Non-destructive Techniques Methodologies for the Detection of Ancient Structures under Heritage Buildings*, „International Journal of Architectural Heritage Conservation, Analysis, and Restoration” 2021, t. 15 (10).
- Grzyb Krzysztof, Drobiec Łukasz, Błazy Julia, Zając Jakub, *The Use of NDT Diagnostic Methods and Calculations in Assessing the Masonry Tower Crowned with the Steel Dome*, „Materials” 2022, t. 15.
- Gupta Mridul, Khan Muhsin, Butola Ravi, Singari Ranganath, *Advances in applications of Non-Destructive Testing (NDT): A review*, „Advances in Materials and Processing Technologies” 2021, t. 8 (2).
- Haelterman Koen, Lambrechts Anja, Janssens Hettie, Van Gemert Dionys, *Geo-electrical survey of masonry*, „Material and Structures” 1993, t. 26.
- Hoła Jerzy, Schabowicz Krzysztof, *State-of-the-art non-destructive methods for diagnostic testing of building structures – anticipated development trends*, „Archives of Civil and Mechanical Engineering” 2010, t. 10 (3).
- Hoła Jerzy, Schabowicz Krzysztof, *Diagnostyka obiektów budowlanych*, „Materiały Budowlane” 2015, t. 513.
- Hussain Aslam, Akhtar Saleem, *Review of Non-Destructive Tests for Evaluation of Historic Masonry and Concrete Structures*, „Civil Engineering” 2017, t. 42.
- Kloiber Michal, Reinprecht Ladislav, Hrivnák Jaroslav, Tippner Jan, *Comparative evaluation of acoustic techniques for detection of damages in historical wood*, „Journal of Cultural Heritage” 2016, t. 20.
- Krentowski Janusz, Knyziak Piotr, Pawłowicz Joanna, Gavardashvili Givi, *Historical masonry buildings' con-*

- dition assessment by non-destructive and destructive testing, „Engineering Failure Analysis” 2023, t. 146.
- Leucci Giovanni, Cataldo Rosella, De Nunzio Giorgio, *Assessment of fractures in some columns inside the crypt of the Cattedrale di Otranto using integrated geophysical methods*, „Journal of Archaeological Science” 2007, t. 34.
- Liu Junshan, Azhar Salman, Willkens Danielle, Li Botao, *Static Terrestrial Laser Scanning (TLS) for Heritage Building Information Modeling (HBIM): A Systematic Review*, „Virtual Worlds” 2023, t. 2.
- Martinho Edite, Dionísio Amelia, *Main geophysical techniques used for non-destructive evaluation in cultural built heritage: A review*, „Journal of Geophysics and Engineering” 2014, t. 11.
- Mishra Mayank, Bhatia Amanjeet, Maity Damodar, *Predicting the compressive strength of unreinforced brick masonry using machine learning techniques validated on a case study of a museum through nondestructive testing*, „Journal of Civil Structural Health Monitoring” 2020, t. 10.
- Moazen Sajad, Banayee Sepideh, Vali Helia, *A Short Introduction to the Concept and Application of Acoustic Methods as a Non-Destructive Approach to Studying and Understanding Architectural Heritage*, „Journal of Research on Archaeometry” 2023, t. 8 (2).
- Moropoulou Antonia, Labropoulos Kyriakos, Delegou Ekaterini, Karoglou Maria, Bakolas Asterios, *Non-destructive techniques as a tool for the protection of built cultural heritage*, „Construction and Building Materials” 2013, t. 48.
- Niemz Peter, Mannes David, *Non-destructive testing of wood and wood-based materials*, „Journal of Cultural Heritage” 2012, t. 13.
- Pérez-Gracia Vega, Caselles Oriol, Clapés Jaime, Martínez Guillermo, Osorio Raul, *Non-destructive analysis in cultural heritage buildings: Evaluating the Mallorca cathedral supporting structures*, „NDT & E International” 2013, t. 59.
- Pérez-Gracia Vega, Caselles Oriol, Clapés Jaime, Osorio Raul, Canas Jose, Pujades Luis, *Radar exploration applied to historical buildings: A case study of the Marques de Llió palace in Barcelona (Spain)*, „Engineering Failure Analysis” 2009, t. 16.
- Piersigilli Patrizia, Citroni Rocco, Mangini Fabio, Frezza Fabrizio, *Electromagnetic Techniques Applied to Cultural Heritage Diagnosis: State of the Art and Future Prospective: A Comprehensive Review*, „Applied Sciences” 2025, t. 15, 6402.
- Qian Wei, Zhu Xujun, Zhang Tao, Li Ning, Zhu Zhaoyang, *Improving non-destructive testing methods for detecting cavity damage and internal defects in stone cultural relics: A focus on ultrasonic testing and acoustic tapping technology*, „Journal of Cultural Heritage” 2024, t. 67.
- Runkiewicz Leonard, *Stosowanie metod nieniszczących w budownictwie*, „Przegląd Budowlany” 2019, t. 6.
- Said Shahrul, Shahrin Muhammad, Johari Muhammad, Abdullah Ahmad, Harun Siti, Latif Zulkiflee, Salleh Nurul, Wongso Jonny, *Effective Building Surveying Using Laser Scanning for Heritage Building Documentation*, „International Journal of Sustainable Construction, Engineering and Technology” 2023, t. 14 (5).
- Schueremans Luc, Rickstal Van, Venderickx Kathleen, Van Gemert Dionys, *Evaluation of masonry consolidation by geo-electrical relative difference resistivity mapping*, „Materials and Structures” 2003, t. 36.
- Solla Mercedes, Maté-González Miguel, Blázquez Cristina, Lagüela-López Susana, Nieto Ignacio, *Analysis of structural integrity through the combination of non-destructive testing techniques in heritage inspections: The study case of San Segundo's hermitage (Ávila, Spain)*, „Journal of Building Engineering” 2024, t. 89, 109295.
- Tejedor Blanca, Lucchi Elena, Bienvenido-Huertas David, Nardi Iole, *Non-destructive techniques (NDT) for the diagnosis of heritage buildings: Traditional procedures and futures perspectives*, „Energy and Buildings” 2022, t. 263 (15).
- Van Gemert Dionys, Janssens Hans, Van Rickstal Filip, *Evaluation of electrical resistivity maps for ancient masonry*, „Materials and Structures” 1996, t. 29.
- Wong Chung, *Applications of Non-destructive Tests for Diagnosis of Heritage Buildings: Case Studies from Singapore and Malaysia*, „Built Heritage” 2019, t. 3 (1).
- Wutke Małgorzata, Konopska-Piechurska Małgorzata, *Nieniszczące metody diagnostyki w budownictwie, materiały z konferencji „Nowoczesna diagnostyka i naprawy nawierzchni drogowych”*, Kielce 2018.
- Zendri Elisabetta, Falchi Laura, Izzo Francesca, Morabito Zeno, Driussi Guido, *A review of common NDTs in the monitoring and preservation of historical architectural surfaces*, „International Journal of Architectural Heritage, Conservation, Analysis, and Restoration” 2017, t. 11 (7).
- Zielińska Monika, Rucka Magdalena, *Assessment of Wooden Beams from Historical Buildings Using Ultrasonic Transmission Tomography*, „International Journal of Architectural Heritage” 2023, t. 17 (1).
- Zielińska Monika, Rucka Magdalena, *Non-Destructive Assessment of Masonry Pillars using Ultrasonic Tomography*, „Materials” 2018, t. 11.
- Zybała Tomasz, Zielińska Monika, Rucka Magdalena, Przewłócki Jarosław, Grębowski Karol, *Typology, current state and non-destructive testing of timber roof trusses of historic churches in the West Vistula Delta, Poland*, „Heritage Science” 2024, t. 12 (156).

Streszczenie

Artykuł dotyczy współczesnych metod nieniszczących stosowanych w diagnostyce obiektów zabytkowych. Najważniejszą cechą tych metod jest brak ingerencji w konstrukcję obiektu. Mają one na celu m.in. rozpoznanie struktury i ocenę jakości elementów konstrukcyjnych, identyfikację ukrytych detali, wad i zniszczeń, wykrywanie zawilgocenia oraz szacowanie parametrów fizycznych i mechanicznych. Diagnostyka obiektów historycznych, mimo znaczącego postępu, jaki dokonał się w ostatnich latach, wciąż pozostaje zadaniem złożonym i czasochłonnym. Wykorzystanie najnowszych metod wymaga nie tylko ich dogłębnej znajomości, zrozumienia mocnych i słabych stron, lecz także dużego doświadczenia praktycznego. W pracy krótko omówiono współczesne metody nieniszczące stosowane w diagnostyce obiektów historycznych oraz zaproponowano ich uproszczoną klasyfikację. Przedstawiono również wybrane problemy związane ze stosowaniem technik nieniszczących, zwłaszcza możliwości ich zastosowania, a także ich zalety, wady i ograniczenia.

Abstract

This paper focuses on modern non-destructive testing methods applied in the diagnostics of historical structures. The most significant feature of these methods is the absence of intervention into the object's structure. Their purpose includes, among others, revealing the structure and assessing the quality of structural elements, identifying hidden details, defects, and damage, detecting moisture, and estimating physical and mechanical parameters. Despite significant progress in recent years, diagnosing historical structures remains a complex and time-consuming task. Utilizing the latest methods requires not only thorough knowledge of them and an understanding of their strengths and weaknesses, but also extensive practical experience. This paper briefly discusses contemporary non-destructive methods used in the diagnosis of historical structures and proposes a simplified classification of these methods. Furthermore, selected problems associated with implementing non-destructive techniques are presented, with particular focus on their applications, advantages, disadvantages, and limitations.