

Łukasz PIECZONKA, Mariusz SZWEDO, Tadeusz UHL
 AKADEMIA GÓRNICZO - HUTNICZA IM. ST. STASZICA, KATEDRA ROBOTYKI I MECHATRONIKI

Termograficzne metody detekcji uszkodzeń

Mgr inż. Łukasz PIECZONKA

Ukończył studia na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Akademii Górniczo - Hutniczej w Krakowie. Od 2005 roku doktorant w Katedrze Robotyki i Mechatroniki AGH. W swojej działalności naukowej zajmuje się badaniami dynamiki struktur z niepewnymi parametrami, analizą modalną, monitorowaniem stanu konstrukcji, symulacjami numerycznymi oraz metodami statystycznymi.



e-mail: lukasz.pieczonka@agh.edu.pl

Mgr inż. Mariusz SZWEDO

Ukończył studia na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Akademii Górniczo - Hutniczej w Krakowie. Od 2005 roku doktorant w Katedrze Robotyki i Mechatroniki AGH. W swojej działalności naukowej zajmuje się przetwarzaniem i analizą obrazów, zastosowaniem technik wizyjnych, wykorzystaniem wizji maszynowej w zagadnieniach sterowania układami mechatronicznymi oraz wykorzystaniem technik termowizyjnych w diagnostyce konstrukcji.



e-mail: mariusz.szwedo@agh.edu.pl

Prof. dr hab. inż. Tadeusz UHL

Jest kierownikiem Katedry Robotyki i Mechatroniki Akademii Górniczo - Hutniczej w Krakowie. Zainteresowania naukowe to diagnostyka i monitorowanie stanu konstrukcji, dynamika konstrukcji, analiza modalna, układy aktywnej redukcji drgań, układy sterowania i szeroko pojęta mechatronika. Jest autorem 16 książek oraz ponad 500 publikacji naukowych w czasopismach krajowych i zagranicznych dotyczących wspomnianych zagadnień.



e-mail: tuhl@agh.edu.pl

methods combine the advantages of both. In recent years thermography has emerged as a widely used method for nondestructive testing. Thermography is a nondestructive, noncontact, wide area damage detection method. It can detect subsurface defects, and can be used as an alternative or complement to conventional inspection technologies. Of special interest due to the effectiveness is vibrothermography also referred to as ultrasound thermography. The paper presents the state-of-the-art in thermographical damage detection techniques and describes some of the experimental investigations carried out by the authors.

Keywords: thermography, damage detection, structural health monitoring.

1. Wstęp

Detekcja uszkodzeń jest istotnym czynnikiem technicznym i ekonomicznym w eksploatacji urządzeń i konstrukcji [1]. Niezawodna i dokładna metoda nieniszczącego badania konstrukcji pod kątem wystąpienia uszkodzeń jest kluczowym elementem systemów Monitorowania Stanu Konstrukcji (SHM). Monitorowanie Stanu Konstrukcji ma ogromne znaczenie dla poprawy bezpieczeństwa obiektów technicznych oraz silne ekonomicznie uzasadnienie. Wymaga umiarkowanych nakładów finansowych a może wyeliminować katastrofalne uszkodzenia informując odpowiednio wcześniej o wystąpieniu problemu oraz znacznie zredukować koszty przestojów i napraw. Ma to istotne znaczenie dla starzejącej się infrastruktury technicznej oraz nowo projektowanych i powstających obiektów technicznych i urządzeń.

2. Podstawy fizyczne i podział metod termograficznych

Każde ciało o temperaturze wyższej od zera bezwzględnego (0 K) emituje promieniowanie podczerwone. Promieniowanie to zwane również promieniowaniem cieplnym jest promieniowaniem elektromagnetycznym o długości fal pomiędzy światłem widzialnym i falami radiowymi tj. od 740 nm do 1 mm. Jedną z najważniejszych wielkości wpływających na pomiary termograficzne jest emisyjność powierzchni mierzonych obiektów. Emisyjność jest to bezwymiarowa wielkość fizyczna mieszcząca się w zakresie od 0 do 1 (dla ciała doskonale czarnego) charakteryzująca właściwości promieniowania ciał stałych [3, 4]. Wartość emisyjności obiektu jest uzależniona od parametrów charakterystycznych dla danego materiału:

- temperatury,
- składu chemicznego,
- stanu fizycznego powierzchni.

Z tego względu w niektórych przypadkach dla uzyskania lepszych wyników pomiarów termograficznych konieczne jest odpowiednie przygotowanie powierzchni mierzonego obiektu. Dla przykładu dla konstrukcji wykonanej z polerowanego metalu pomocne będzie zamalowanie jej cienką warstwą czarnej farby.

Badania termograficzne opierają się na pomiarze i analizie rozkładu temperatury na powierzchni badanych obiektów [4-18].

Streszczenie

Detekcja uszkodzeń jest istotnym czynnikiem technicznym i ekonomicznym w eksploatacji urządzeń i konstrukcji. Za Inman i inni [1] uszkodzenie definiuje się jako zamierzoną lub niezamierzoną zmianę własności materiałowych lub geometrycznych obiektu, włączając w to warunki brzegowe, która ujemnie wpływa na aktualny i przyszły stan tego obiektu. Niezawodna i dokładna metoda nieniszczącego badania konstrukcji pod kątem wystąpienia uszkodzeń jest kluczowym elementem systemów Monitorowania Stanu Konstrukcji (SHM). Metody termograficzne są metodami bezkontaktowymi, nieniszczącymi i dającymi informację diagnostyczną dla znacznych powierzchni w trakcie jednego pomiaru (tj. zależności od pola widzenia kamery termowizyjnej). W zależności od konfiguracji pomiarowej istnieje możliwość wykrywania wielu typów uszkodzeń. W artykule przedstawiono przegląd aktualnych rozwiązań w zakresie termograficznych metod detekcji uszkodzeń oraz opisano prace aplikacyjne prowadzone przez autorów.

Słowa kluczowe: termografia, detekcja uszkodzeń, monitorowanie stanu konstrukcji.

Thermographical damage detection techniques

Abstract

Damage detection is an important issue in contemporary engineering. Following Inman et. al. [1] damage in a structural system can be defined as intentional or unintentional change to the material and/or geometric properties of the system, including changes to the boundary conditions and system connectivity, which adversely affect the current or future performance of that system. Therefore the knowledge about the existence of damage in the structure is an important element in maintenance and monitoring of structures. A reliable, accurate and nondestructive damage detection method is a key element in applications like Structural Health Monitoring (SHM) and Damage Prognosis. Nondestructive Testing (NDT) methods for damage detection can be divided into two broad groups- global and local methods. Global methods are used in monitoring of whole structures while local methods are used in monitoring of structural parts. Global methods do not require a priori information about the estimated location of damage but they are also less sensitive to small damage. Local methods on the other hand need a dense sensor network or information about critical points on the structure where the damage can occur but are more sensitive to small damage and sometimes can identify the type of damage. There are many approaches for damage detection in each group, and thermographical

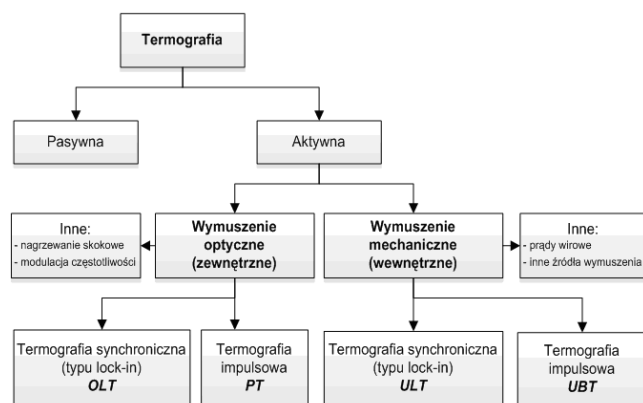
Techniki termowizyjne można podzielić na dwie główne grupy:

- techniki pasywne,
- techniki aktywne.

Techniki pasywne polegają na pomiarze rozkładu temperatury na powierzchni badanych obiektów i nie wymagają doprowadzenia energii zewnętrznej do mierzonego układu. Pomiarzy pasywne używane są np. w budownictwie i w zagadnieniach, które wymagają jedynie jakościowej oceny nieprawidłowości w rozkładzie temperatur. Przykładem mogą być pomiary termograficzne budynków mające na celu sprawdzenie skuteczności ocieplenia i identyfikację miejsc, przez które tracona jest energia np. nieszczelne okna. Innym przykładem może być wyszukiwanie ludzi w ruinach budynku. Techniki pasywne nie są używane w detekcji uszkodzeń.

Techniki aktywne zakładają, że do mierzonego układu doprowadzona będzie energia zewnętrzna. Energia ta może być doprowadzona na różne sposoby – na przykład przez ogrzanie struktury lampami halogenowymi, wiązką laserową lub wzbudzenie struktury do drgań przetwornikiem piezoelektrycznym czy magnetostrykcyjnym. W zależności od stosowanego wymuszenia techniki pomiarów termowizyjnych można podzielić na następujące grupy (rys. 1):

- Termografia synchroniczna z wymuszeniem optycznym - Optical Lock-in Thermography (OLT),
- Termografia impulsowa z wymuszeniem optycznym - Pulsed Thermography (PT),
- Wibrotermografia synchroniczna - Ultrasound Lock-in Thermography (ULT),
- (Fazowa) Wibrotermografia impulsowa – Ultrasound Burst (Phase) Thermography (UBT).



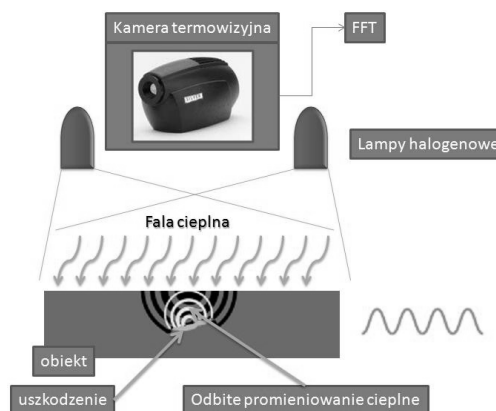
Rys. 1. Podział technik termograficznych
Fig. 1. Classification of thermographical techniques

Termografia z wymuszeniem optycznym jest metodą pomiarów dynamicznych bazującą na pomiarze z wykorzystaniem analizy fali termicznej (rys. 2). Falą wymuszającą w zależności od wariantu metody (lock-in lub impulsowa) jest generowana za pomocą lamp halogenowych, laserów lub pistoletów cieplnych fala sinusoidalna lub impulsy termiczne. Fala termiczna kierowana jest w stronę badanej konstrukcji. Kamera termowizyjna rejestruje sekwencję obrazów po dostarczeniu do układu energii zewnętrznej i analizuje zmianę termoemisji dla każdego piksela obrazu. Na bazie analizy obrazów wnioskować można o występowaniu defektów strukturalnych w badanym obiekcie.

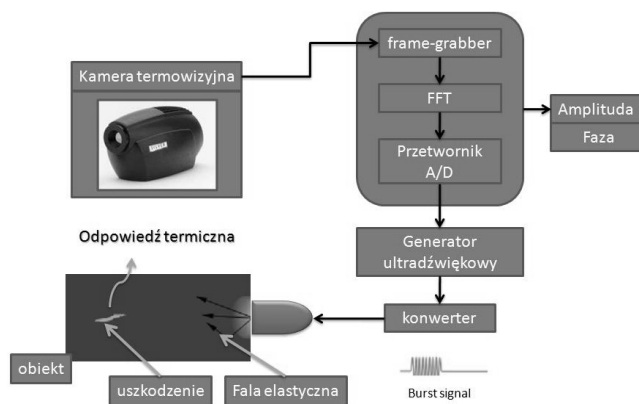
Metody z wymuszeniem optycznym - zarówno wariant lock-in jak i wariant impulsowy - są dobrze poznane i doczekały się wielu opracowań w literaturze [4, 13-16]. Jedną z głównych wad tych metod jest konieczność stosowania wyrafinowanych algorytmów obróbki obrazu z celu wyeliminowania efektów nierównomiernego ogrzania powierzchni i niejednorodności w emisyjności mierzonych powierzchni.

Metody termograficzne z wymuszeniem wewnętrznym nie są tak dobrze przeanalizowane jak metody z wymuszeniem optycznym [5-12, 17-19]. W metodach tych, jako wymuszenie stosuje się zwykle przetworniki ultradźwiękowe wysokiej mocy (rys. 3). Energia dostarczona do obiektu

w postaci fali elastycznej z przetwornika ultradźwiękowego w trakcie przepływu przez jego wnętrze jest rozpraszana na występujących w niej defektach, co generuje odpowiedź termiczną rejestrowaną na powierzchni obiektu. Jeżeli amplituda sygnału ultradźwiękowego jest modulowana sygnałem o niskiej częstotliwości efekt termoemisji przybiera postać oscylacji. W sytuacji takiej w miejscach występowania uszkodzenia wewnątrz struktury emitowana jest fala termiczna, która widoczna jest na rejestrowanym obrazie termicznym, jako niejednorodność pola rozkładu temperatury.



Rys. 2. Termografia z wymuszeniem optycznym
Fig. 2. Optical thermography



Rys. 3. Termografia z wymuszeniem serią impulsów ultradźwiękowych
Fig. 3. Ultrasound Burst Thermography

W przypadku pomiaru wibrotermograficznego analizowane jest zjawisko polegające na wzroście temperatury w strukturze, w miejscach wystąpienia defektów strukturalnych, spowodowanym rozchodzeniem się fal elastycznych w zakresie częstotliwości ultradźwiękowych. Zjawisko to można tłumaczyć na kilka sposobów. Jedną z możliwości jest występowanie lokalnych stref uplastycznienia materiału spowodowanych rozchodzeniem się fali sprężystej, na przykład w miejscach pęknięć, co powoduje wzrost temperatury w tych miejscach. Istnieje też możliwość generowania ciepła w miejscach defektów strukturalnych wynikająca z tarcia np. przeciwnych ścianek pęknięcia czy delaminacji [6, 7]. Za Zinoviev i Ermakov [2] można powiedzieć również, że każdy materiał przejawia odstępstwa od idealnie sprężystego zachowania nawet dla małych odkształceń. W przypadku okresowego wymuszenia odstępstwa te przejawiają się, jako nieodwracalna utrata energii w materiale. Jest wiele przyczyn takich strat energii wliczając zamianę energii mechanicznej na ciepło (termosprężystość), powiększanie się mikropęknięć i innych nieciągłości struktury, odkształcenia plastyczne struktury krystalicznej i inne. W miejscach wystąpienia defektów strukturalnych występuje zwiększona podatność mechaniczna stąd więcej energii tracone jest w postaci ciepła.

Na bazie przeprowadzonego studium literaturowego i wstępnych wyników prac własnych zespołu można stwierdzić, że najważniejszymi czynnikami fizycznymi są efekty tarciove na interfejsach defektów strukturalnych (np. przeciwległych ścianek pęknięcia) oraz efekt termosprężystości.

Efekt termosprężysty wykorzystywany jest w technice do pomiaru naprężeń w drgających strukturach i jest dobrze opisany w literaturze [3].

Zależność pomiędzy odkształceniem, naprężeniem a zmianą temperatury opisuje następująca zależność:

$$\Delta\varepsilon = \frac{(1-2\nu)\Delta\sigma}{E} + 3\alpha\Delta T \quad (1)$$

gdzie: $\Delta\varepsilon$ – zmiana sumy odkształceń głównych, $\Delta\sigma$ – zmiana sumy naprężeń głównych, ν współczynnik Poissona, ΔT – zmiana temperatury, α – współczynnik rozszerzalności cieplnej, E – moduł Younga.

Zakładając, że zmiany naprężeń zachodzą na tyle szybko, aby założyć przemianę adiabatyczną można przyjąć, że zmiana odkształcenia $\Delta\varepsilon$ wywołuje zmianę temperatury ΔT równą:

$$\Delta T = \frac{-3T\alpha K\Delta\varepsilon}{\rho C_v} \quad (2)$$

gdzie: K – moduł ściśliwości, Pa, C_v – ciepło właściwe przy stałej objętości, J/kg K, ρ – gęstość, kg/m³, T – temperatura badanego obiektu, K. w efekcie otrzymuje się przybliżoną zależność opisującą zjawisko termosprężystości w postaci:

$$\Delta T = -\frac{\alpha}{\rho C_p} T \Delta\sigma = K_m T \Delta\sigma \quad (3)$$

gdzie: C_p ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu, K_m współczynnik termosprężystości. Zmiana temperatury jest proporcjonalna do zmiany naprężenia obiektu.

Aby efektywnie wykorzystać powyższe zależności w badaniach wibrotermograficznych należy wyeliminować temperaturę bezwzględną badanego obiektu. Dokonuje się tego filtrując składową stałą na etapie przetwarzania zarejestrowanych obrazów ewentualnie stosując specjalne techniki synchronizacji próbkowania obrazu z pobudzeniem termicznym badanego obiektu. Metoda ta pozwala na wykrycie zmian w polu naprężeń spowodowanych przez uszkodzenie struktury.

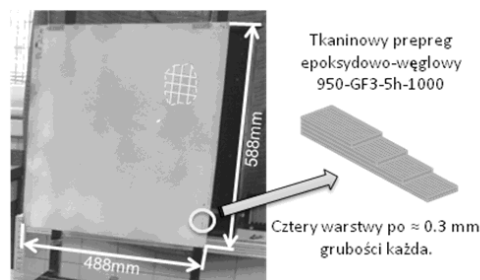
3. Zastosowanie wibrotermografii w detekcji uszkodzeń w płycie kompozytowej

Obiektem badań była płyta z kompozytu węglowo epoksydowego o wymiarach 588×488×1,2 mm przedstawiona na rys. 4. Celem pomiaru było zarejestrowanie odpowiedzi termicznej płyty na wymuszenie falami ultradźwiękowymi z przetwornika wysokiej mocy. Według oczekiwań w odpowiedzi termicznej powinny być widoczne defekty strukturalne analizowanej płyty.

Płyta zamocowana została w ramie stalowej tak, że jej dwa boki były unieruchomione na całej długości. W prawym górnym narożniku płyty wykonano niewielkie uszkodzenie (pęknięcie) będące skutkiem uderzenia mechanicznego.

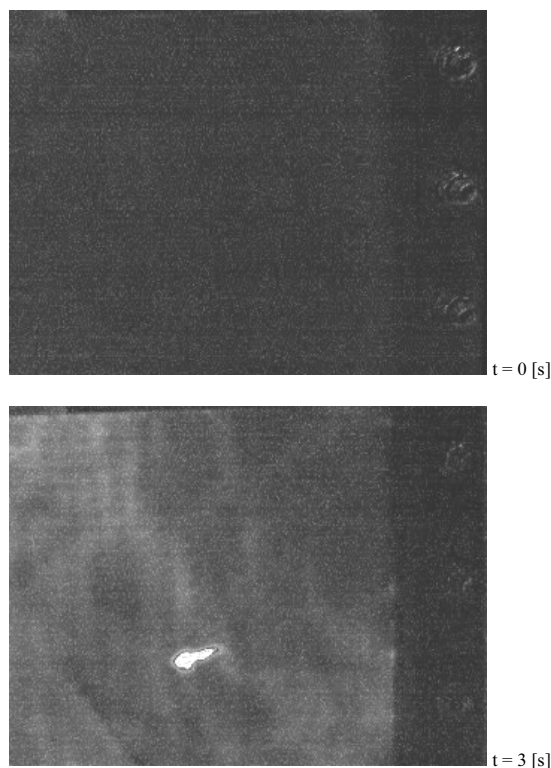
Jako wymuszenia użyto ręcznej zgrzewarki ultradźwiękowej o częstotliwości pracy równej 35 kHz. Moc urządzenia ustawiona została na 100 W. Końcówkę roboczą urządzenia przyciśnięto do płyty w lewym dolnym narożniku tj. po przekątnej względem wykonanego uszkodzenia. Generator sygnału ustawiony był w taki sposób, że urządzenie pracowało ze stałą częstotliwością przez 10 sekund od momentu włączenia.

Jako urządzenie pomiarowe wykorzystana została wysokiej czułości kamera termowizyjna Cedip Silver 420M.



Rys. 4. Obiekt badań
Fig. 4. Test structure

Pole widzenia kamery obejmowało obszar zawierający uszkodzenie tj. prawy górny narożnik płyty. Przed przystąpieniem do pomiaru wykonano zdjęcie termograficzne analizowanego obszaru a uzyskany rozkład temperatur wykorzystany był, jako poziom temperatury tła. W dalszych analizach obserwowano już przyrost temperatury tj. od każdej zmierzonej klatki obrazu odejmowany był zmierzony poziom tła. Na rys. 5 przedstawione zostały zmierzone obrazy różnicowe w dwóch chwilach czasowych – na początku pomiaru, przed samym włączeniem przetwornika ultradźwiękowego, oraz po trzech sekundach od momentu włączenia przetwornika.



Rys. 5. Obrazy różnicowe zarejestrowane kamerą termowizyjną (skala względna)
Fig. 5. Differential images registered with IR camera (arbitrary scale)

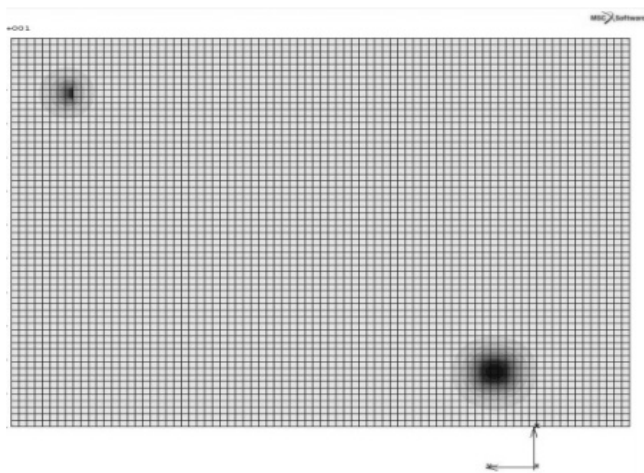
Na przedstawionych obrazach widać wyraźnie, że uszkodzenie wprowadzone w płycie jest wyraźnie widoczne już po krótkim czasie i bez konieczności wykonywania dodatkowej obróbki obrazu, co potwierdza ogromny potencjał użytej metody pomiarowej.

4. Symulacje numeryczne

Jak wspomniano w punkcie 3 zjawiska fizyczne odgrywające najistotniejszą rolę w pomiarach wibrotermograficznych nie zostały jeszcze jednoznacznie wyjaśnione w literaturze. Co za tym idzie występują trudności w modelowaniu numerycznym takich pomiarów. Autorzy prowadzą badania nad opracowaniem modeli numerycznych pozwalających w pierwszym kroku na jakościową

a docelowo ilościową ocenę rozkładu temperatur w mierzonym obiekcie dla zadanej konfiguracji pomiarowej. Modele bazujące na Metodzie Elementów Skończonych (MES) dla przypadku pomiaru termograficznego z wymuszeniem optycznym (rys. 6), wykonane w komercyjnym pakiecie oprogramowania MSC.Marc 2008, potwierdziły swoją skuteczność w jakościowym odwzorowaniu danych eksperymentalnych. Na przedstawionym rysunku widać zmianę charakteru rozkładu temperatury w płycie aluminiowej z zasymulowanymi defektami strukturalnymi.

Aktualnie opracowywane są modele numeryczne uwzględniające dwa jak się wydaje najważniejsze efekty w wibrotermografii tj. tarcie i termosprężystość. Opis tych modeli wykracza jednak poza zakres niniejszego opracowania.



Rys. 6. Przykładowy wynik symulacji dla płyty aluminiowej (skala względna)
Fig. 6. Sample numerical results for an aluminum plate (arbitrary scale)

Dokładne modele numeryczne pozwoliłyby na optymalizację konfiguracji pomiarowych i projektowanie systemów monitorowania stanu konstrukcji dla konkretnych obiektów technicznych.

5. Wnioski

W artykule przedstawiono przegląd nieniszczących metod detekcji uszkodzeń wykorzystujących termografię. Metody termograficzne zyskują coraz większe uznanie w badaniach nieniszczących ze względu na swoje zalety oraz dostępność wysokiej klasy kamer termowizyjnych i osprzętu pomiarowego umożliwiającą łatwą konfigurację systemów pomiarowych.

Metody termograficzne są metodami bezkontaktowymi, nieniszczącymi i dającymi informację diagnostyczną dla znacznych powierzchni badanego obiektu w trakcie jednego pomiaru (tj. niezależnie od pola widzenia kamery termowizyjnej). W odróżnieniu od potencjalnych alternatyw dla metod termograficznych, wśród których wymienić można ultradźwiękowe systemy C-Scan oraz systemy oparte na promieniowaniu rentgenowskim, badane komponenty nie muszą być demontowane ze struktury oraz nie ma ograniczeń co do ich maksymalnej wielkości. Cecha ta umożliwia wykorzystanie metod termograficznych w systemach Monitorowania Stanu Konstrukcji (SHM). Inspekcja dużych obiektów może być przeprowadzona w trakcie jednego pomiaru (jeżeli dostępna jest kamera termowizyjna o dużej rozdzielczości) lub serii pomiarów wykonując obrazowanie obiektu obszar po obszarze. W celu wykonania serii pomiarów wymagana jest jedynie zmiana pola widzenia kamery oraz ewentualnie miejsca wymuszenia. W zależności od konfiguracji pomiarowej istnieje możliwość wykrywania wielu typów uszkodzeń.

Pomiary termograficzne mogą być wykonywane przez przeszkolonego operatora, ale niebędącego specjalistą w dziedzinie technik pomiarowych, czy analizy obrazu. Omawiane metody mogą stanowić alternatywę lub uzupełnienie dla istniejących systemów detekcji uszkodzeń.

Na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych można stwierdzić ogromny potencjał metod wibrotermograficznych w detekcji uszkodzeń. Prace badawcze prowadzone przez autorów mają na celu lepsze zrozumienie fizyki analizowanych zjawisk, co pozwoli na budowę dokładniejszych modeli numerycznych oraz badania eksperymentalne na różnego rodzaju obiektach technicznych.

Artykuł prezentuje wyniki prac realizowanych w projekcie badawczym nr R0301502 finansowanym przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

6. Literatura

- [1] Inman D. J., Farrar C. R., Lopes V. Jr., Steffen V. Jr.: *Damage Prognosis for Aerospace, Civil and Mechanical Systems*, John Wiley & Sons, 2005.
- [2] Zinoviev P. A., Ermakov Y. N.: *Energy Dissipation in Composite Materials*, CRC Press, 1994.
- [3] Harwood N., Cummings W. M.: *Thermoelastic Stress Analysis*, IOP Publishing Ltd., 1991.
- [4] Maldague X.: *Nondestructive Evaluation of Materials by Infrared Thermography*, Springer-Verlag, 1993.
- [5] Favro L. D., Han X., Ouyang Z., Sun G., Sui H., Thomas R. L.: Infrared imaging of defects heated by a sonic pulse, *Review Of Scientific Instruments*, Vol. 71 (6), 2000.
- [6] Han X., Sarwar Islam Md., Newaz G., Favro L.D., Thomas R.L.: Finite-element modeling of acoustic chaos to sonic infrared imaging, *Journal of Applied Physics*, Vol. 98, 2005.
- [7] Han X., Sarwar Islam Md., Newaz G., Favro L.D., Thomas R.L.: Finite-Element Modeling of the Heating of Cracks in Sonic Infrared Imaging, *Journal of Applied Physics*, Vol. 99, 2006.
- [8] Zweschper Th., Dillenz A., and Busse G.: Ultrasound Lock-in Thermography - a defect selective NDT method for the inspection of aerospace components, *Insight*, 43, pp. 173-179, 2001.
- [9] Zweschper T., Dillenz A., Riegert G., Busse G.: Thermography with excitation by elastic waves: comparison of techniques (pulse, burst, lockin), *Quantitative Infrared Thermography QIRT*, pp. 47-52, 2002.
- [10] Dillenz A., Buse G., Wu D.: Ultrasound lockin thermography: feasibility and limitations, *Diagnostic imaging technologies and industrial applications*, SPIE Proc., Vol. 3827, pp. 10 -15, 1999.
- [11] Dillenz A., Zweschper T. and Busse G.: Progress in ultrasound phase thermography, *SPIE Proc.*, Vol. 4360, *Thermosense XXVIII*, pp. 574-579, 2001.
- [12] Zweschper T., Riegert G., Dillenz A. and Busse G.: Frequency modulated elastic wave thermography, *SPIE Proc.*, Vol. 5073, *Thermosense XXV*, Orlando, FL, pp. 386-391, 2003.
- [13] Maldague X., Galmiche F., Ziadi A.: *Advances in pulsed phase thermography*, *Infrared Physics & Technology* 43, pp. 175-181, 2002.
- [14] Ibarra-Castanedo, Galmiche F., Darabi A., Pilla M., Ziadi A., Valler S., Pelletier J. -f., Maldague X.: Thermographic nondestructive evaluation: overview of recent progress, *SPIE Proc.*, Vol. 5073, *Thermosense XXV*, pp. 450-459, 2003.
- [15] Maldague X.: *Applications Of Infrared Thermography In Nondestructive Evaluation*, *Trends in Optical Nondestructive Testing and Inspection*, Pramod Rastogi ed., pp. 591- 609, Elsevier, 2000.
- [16] Maldague X. P. and Marinetti S. *Pulse Phase Infrared Thermography*, *Journal of Applied Physics*, Vol. 79 (5), pp. 2694-2698, 1996.
- [17] Zalameda J., Winfree W. P., Yost W. T.: Air Coupled Acoustic Thermography Inspection Technique, *Review of progress in quantitative nondestructive evaluation: 34th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*. AIP Conference Proceed-ings., Vol. 975, pp. 467-474, 2008.
- [18] Shepard S. M., Ahmed T., Lhota J. R.: *Experimental Considerations in Vibrothermography*, *SPIE Proc.*, *Thermosense XXVI*, 2004.
- [19] Holland S. D.: *First Measurements from a New Broadband Vibrothermography Measurement System*, *Review of progress in quantitative nondestructive evaluation*. AIP Conference Proceedings, Vol. 894, pp. 478-483, 2007.