

ZASTOSOWANIE BADAŃ NIENISZCZĄCYCH W TECHNICIE LOTNICZEJ

JÓZEF KRYSZTOFIK, WOJCIECH MANAJ

Instytut Lotnictwa

Streszczenie

Z uwagi na rosnące zapotrzebowanie oceny konstrukcji technicznych bez konieczności ich zniszczenia w szerokim zakresie rozwija się dziedzina badań nieniszczących. Tradycyjnie stosowane metody badań: wizualna, penetracyjna, magnetyczno-proszkowa, ultradźwiękowa i radiograficzna są rozwijane w specjalizowane techniki np. badanie ultradźwiękowe głowicami mozaikowymi lub nowe metody detekcji wad takie jak np. metoda akustyczna lub termograficzna.

Kontrole nieniszczące są stosowane ze względu na bezpieczeństwo użytkowania elementów lotniczych oraz ekonomiczne konsekwencje odstawienia konstrukcji od użytku. Kontrole prowadzone są zarówno na etapie wytwarzania jak i eksploatacji. Nie bez znaczenia dla doboru stosowanych metod jest także szeroki zakres materiałów stosowanych w konstrukcjach lotniczych.

W artykule przedstawiono wybrane metody oceny jakości materiałów konstrukcji lotniczych wraz z przykładami wykonanych badań.

1. WSTĘP

Przemysł transportowy w tym w szczególności przemysł lotniczy wykorzystując nowe rozwiązania z zakresu inżynierii materiałowej poszerzając stale zakres stosowanych materiałów konstrukcyjnych. Szeroki zakres stosowanych materiałów w technice lotniczej obejmujący między innymi stopy metali jak i materiały kompozytowe [1] wymusza dopasowanie metod badawczych do stosowanych materiałów oraz do etapu eksploatacji elementu.

Względy bezpieczeństwa użytkowania konstrukcji lotniczych wymuszają monitorowanie stanu materiału konstrukcji na etapie wytwarzania i eksploatacji elementów. Jest ono uzasadnione także ze względu na sprawność użytkowania konstrukcji i rozmiarami potencjalnych strat wywołanych zarówno zniszczeniem urządzenia lub jego nieplanowanym postojem. Ma to szczególne znaczenie w lotnictwie, gdzie ewentualna awaria może wywołać poważne konsekwencje doprowadzając w rezultacie do katastrofy.

Rozwiązaniem modelowym zagadnienia oceny stanu konstrukcji jest zastosowanie badań nieniszczących, dla których wykonanie badania nie wpływa na stan badanej konstrukcji i można je wykonywać dowolną ilość razy. Opracowane nowe bądź modyfikacja dotychczasowych metod NDT pozwala na zastosowanie metod nieniszczących do oceny stanu nowoczesnych materiałów oraz możliwości prognozowania dalszej eksploatacji konstrukcji.

Stosowane współcześnie metody NDT pozwalają także na monitorowanie w czasie rzeczywistym stanu materiału wykorzystując czujniki zamocowane bezpośrednio na badanym elemencie lub w niego wbudowane. Pozwala to na monitorowanie stanu konstrukcji bez planowych przeglądów aż do momentu, gdy system monitorowania stanu konstrukcji zaalarmuje użytkownika o pojawieniu się uszkodzenia i potrzebie przeprowadzenia naprawy.

W artykule przedstawiono wybrane metody oceny jakości materiałów konstrukcji lotniczych poparte przykładami wykonanych badań.

2. METODY BADAŃ NIENISZCZĄCYCH

Z uwagi na stosowanie wyśrubowanych współczynników bezpieczeństwa stosowanych przy projektowaniu zaawansowanych technologicznie konstrukcji lotniczych wzrasta zapotrzebowanie na wykonanie oceny stanu materiału na wszystkich etapach życia konstrukcji. Stąd duże zainteresowanie specjalistycznymi techniki badań nieniszczących umożliwiającymi ocenę struktury wewnętrznej materiałów bez konieczności ich niszczenia. Badania dotyczą zarówno etapu kontroli produkcyjnej jak też planowanych badań eksploatacyjnych.

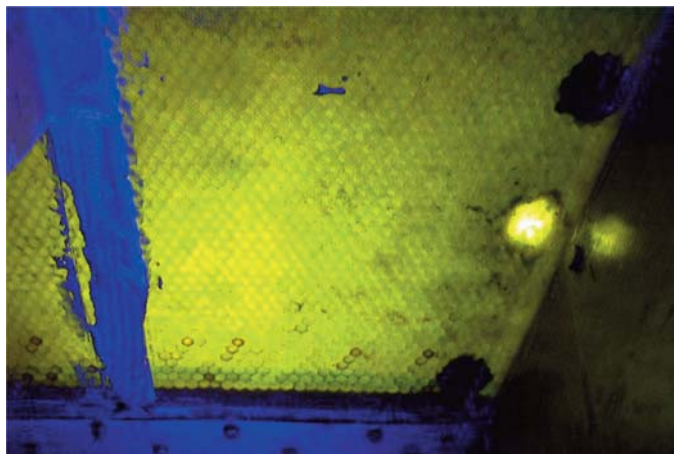
Tradycyjnie stosowane metody badań powierzchniowych (wizualne, penetracyjne i magnetyczno-proszkowe) i objętościowe (ultradźwiękowe i radiograficzne) są rozwijane w specjalizowane techniki. Szeroki zakres stosowanych materiałów w konstrukcjach lotniczych spowodował rozwój istniejących metod o specjalizowane techniki do badań konstrukcji lotniczych takich jak metody akustyczne, rezonansowe, termowizyjne, interferometryczne a także metody wchodzące w skład Structural Health Monitoring (SHM).

3. METODY POWIERZCHNIOWE

Badanie wizualne są najczęściej przeprowadzanym testem w technice lotniczej. Wykonuje się je zarówno „okiem nieuzbrojonym” (rysunek 1 i 2) jak również za pomocą specjalistycznych urządzeń umożliwiających badania powierzchni trudnodostępnych. Wykorzystuje się w tym celu: boroskopy, endoskopy lub wideo endoskopy. Obserwowane wady podlegają ocenie i rejestracji.



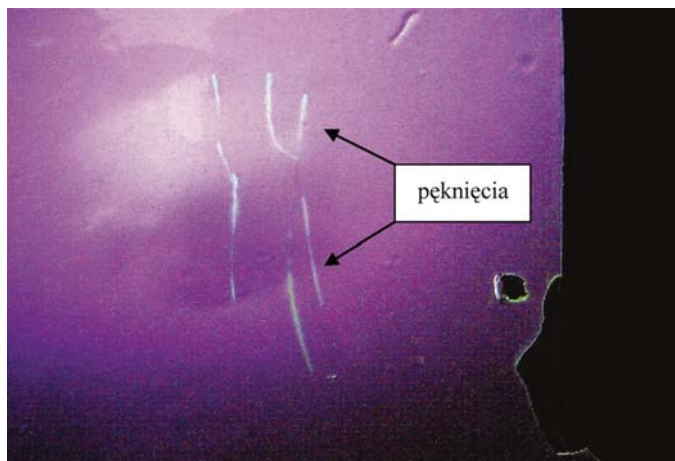
Rys. 1. Wyniki obserwacji struktury przekładkowej w świetle odbitym



Rys. 2. Wyniki obserwacji struktury przekładkowej w świetle przechodzącym

4. METODA PENETRACYJNA

Metoda penetracyjna jest szeroko stosowana do wykrywania wad powierzchniowych ze względu na brak ograniczeń przy badaniu różnych typów materiałów (rysunek 3). Najczęściej stosowana jest do sprawdzania jakości konstrukcji wykonanych ze stopów stali, stopów aluminium, miedzi lub tytanu. Metoda penetracyjna polega ujawnianiu środka penetracyjnego zgromadzonego wewnątrz wad na powierzchni diagnozowanego elementu w trakcie wykonywania badań. Stosowanie technik barwnych i fluorescencyjnych zapewnia wysoką czułość badania.

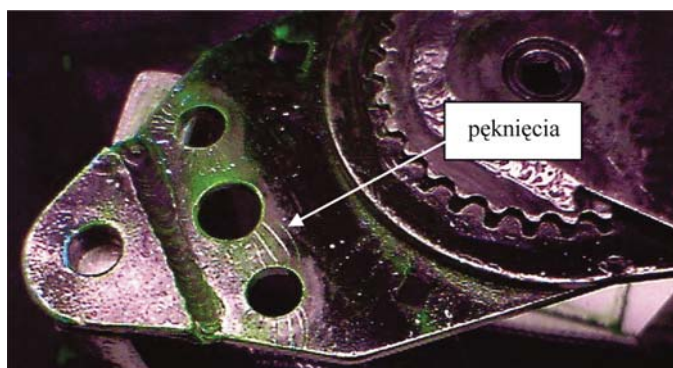


Rys. 3. Wyniki badania penetracyjnego poszycia – technika fluorescencyjna

5. METODA MAGNETYCZNO-PROSZKOWA

Metoda magnetyczno-proszkowa jest techniką służącą do wykrywania wad powierzchniowych lub znajdujących się bezpośrednio pod powierzchnią badanego materiału. Metodą tą można przeprowadzić badania jedynie materiałów ferromagnetycznych takich jak stopy

żelaza, niklu i kobaltu. Wykonanie badania jest relatywnie łatwe i nie wymaga wysoce wyspecjalizowanego sprzętu. Metoda magnetyczno-proszkowa polega na namagnesowaniu badanego obszaru z jednoczesnym naniesieniem proszku ferromagnetycznego. Proszek magnetyczny gromadzi się w miejscach zdefektowania materiału (rysunek 4). Do badań stosujemy defektoskopy jarzmowe, magnesy stałe, cewki wzbudzające oraz elektrody i pręty do wzbudzania prądowego. Podobnie jak w przypadku badań penetracyjnych stosuje się techniki barwne i fluorescencyjne.



Rys. 4. Wyniki badania magnetyczno-proszkowego okucia – technika fluorescencyjna

6. METODY OBJĘTOŚCIOWE

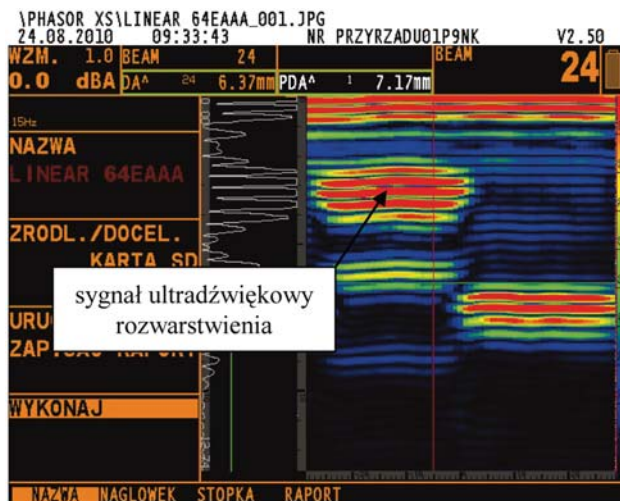
Zarówno badania **metodą radiograficzną** jak i **ultradźwiękową** umożliwiają wykrycie wad położonych we wnętrzu materiału. Obie metody mogą być stosowane zarówno do materiałów metalowych jak i kompozytowych. Ich specyfika predestynuje je do badania odmiennych elementów. Dla przykładu badania ultradźwiękowe stosuje się do badań kompozytów o niewielkich grubościach, dla których przenikalność promieni rtg jest znaczna. Metoda radiograficzna może być jednak bardziej skuteczna np. do wykrywania uszkodzeń metalowego wypełniacza ulowego w strukturach przekładkowych lub też sprawdzania prawidłowości montażu metalowych elementów konstrukcyjnych wewnątrz struktury kompozytowej.

Z uwagi na szerokie zastosowanie badań ultradźwiękowych w technice lotniczej [2] rozwinęto je o szereg technik stosowanych do badania specyficznych obiektów. Przykładami są techniki głowic rolkowych, C-scan oraz phased array.

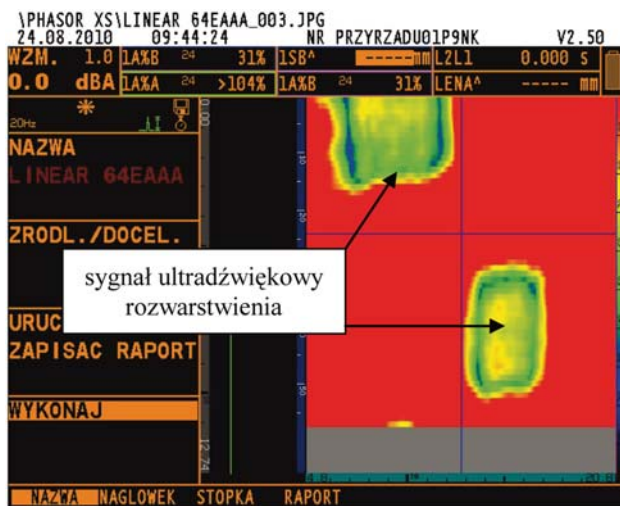
Najbardziej popularną techniką badań w technice lotniczej są badania techniką A-skan (badania z obrazowaniem sygnału ultradźwiękowego typu A). W zależności od badanego elementu stosuje się technikę kontaktową, z klinem opóźniającym lub z zastosowaniem specjalnych głowic rolkowych. Zastosowanie technik ze zobrazowaniem typu B i C jest rzadziej stosowane i wymaga zastosowania bardziej zaawansowanych technicznie urządzeń.

Zastosowanie **zobrazowania typu B (B-scan)** i **C (C-scan)** w badaniach wymaga komputerowego zapisu sygnału ultradźwiękowego i późniejszej jego obróbki. Wyniki pomiarów w przypadku zobrazowania typu B są wizualizowane w postaci obrazu przekroju badanego elementu (rysunek 5) natomiast zobrazowania typu C w postaci obrazu zdefektowania materiału, który można porównać do prześwietlenia promieniami rtg (rysunek 6). Dzięki postępowi w miniaturyzacji urządzeń elektronicznych i znacznemu zwiększeniu ich możliwości obliczeniowych możliwe jest wykonanie pomiarów i późniejsza wizualizacja wyników badań. Zobrazowanie typu B i C znajduje swoje zastosowanie w pomiarach stopów metali a także materiałów

kompozytowych. Zazwyczaj metody te można stosować wykorzystując do tego celu to samo urządzenie badawcze.



Rys. 5. Wyniki pomiaru laminatu, zobrazowanie typu B przedstawiające rozwarstwienie



Rys. 6. Wyniki pomiaru laminatu, zobrazowanie typu C przedstawiające rozwarstwienie

Ze względu na wielkość badanych elementów konstrukcji lotniczych stosuje się wysoko specjalizowane automatyczne systemy. Wykorzystują one zobrazowanie typu C do wizualizacji pomiarów tłumienia fali ultradźwiękowej w strukturze kompozytowych. Wysoka dokładność pomiaru położenia obszarów o różnych właściwościach akustycznych zapewniona jest poprzez automatyczną rejestrację położenia głowic podczas badania. Systemy C-scan przeznaczone do badań elementów kompozytowych z reguły opierają się na wykorzystaniu strumieniowego sprzężenia wodnego. Polega on na sprzężeniu akustycznym poprzez strumień wody uformo-

wany pomiędzy głowicą a badanym elementem. Ultradźwiękowa technika C-scan jest obecnie uważana za jedną z najbardziej dokładnych i wiarygodnych technik badań nieniszczących elementów kompozytowych w przemyśle lotniczym. Dużym atutem tej techniki jest możliwość zapisu wyników badania w postaci cyfrowej.

Do metod ultradźwiękowych należy także zaliczyć **techniki rezonansowe** bazujące na pomiarze drgań rezonansowych badanego materiału. Znajdują one zastosowanie głównie w badaniu kompozytów o konstrukcji warstwowej. Różnica w charakterze drgań materiału (zmiana amplitudy i fazy) spowodowana zmianą modułu sprężystości oraz grubości materiału znajdującego się pod głowicą pozwala na lokalizację rozwarstwień materiału.

7. METODY AKUSTYCZNE

Tap test najstarszą metodą stosowaną do kontroli jakości wyrobów kompozytowych. Polega na opukiwaniu kompozytu specjalnym młoteczkim i wysłuchiwanie uzyskiwanego odgłosu. Na podstawie wysokości uzyskiwanego dźwięku znajduje się i ocenia wielkość wadliwych obszarów. Pomimo niewątpliwiej zalety związanej z jej prostotą w wykrywaniu nieciągłości znajdujących się blisko powierzchni (niedoklejenia, rozwarstwienia) jest to metoda obciążona wysokim subiektywizmem związanych z osobą wykonującego badania. Trwają próby automatyzacji procesu pomiarowego (rysunek 7). Należy zauważyć, że czułość techniki wyraźnie spada ze wzrostem głębokości wad pod opukiwaną powierzchnią.



Rys. 7. Tap test – (Wavelength NDT [3])

Nowoczesną i ciągle rozwijaną techniką pozwalającą badać zarówno elementy metalowe jak i kompozytowe jest technika emisji akustycznej. Metoda polega na rejestrowaniu i analizie sygnałów akustycznych emitowanych z konstrukcji. Pozwala ona na wykrywanie i lokalizację rozpoczynających się procesów degradacji struktury w postaci mikropęknięć, rozwarstwień oraz w niektórych przypadkach na wykrywanie procesów korozyjnych. Zaletą tej techniki jest możliwość monitorowania całej objętości obiektu podczas badania. Wymaganiem niezbędnym do poprawnego wykonania pomiaru jest konieczność obciążenia badanego elementu w celu uaktywnienia pęknięć w badanym elemencie.

8. METODY TERMOWIZYJNE

Badanie termowizyjne polega na analizie dynamiki utraty ciepła przez badany element po jego uprzednim ogrzaniu. Ogrzanie elementu realizuje się poprzez silny impuls ciepła. Obszary zdefektowane wolniej tracą ciepło dzięki temu są obserwowane jako obszary o wyższej temperaturze. Dzięki badaniu można w przybliżeniu określić zarówno rozmiary poprzeczne jak też głębokość wad.

9. METODY INTERFEROMETRYCZNE

W zastosowaniach lotniczych techniki interferometryczne stosuje się głównie do elementów kompozytowych. Do badań interferometrycznych zalicza się **technikę holograficzną** i **szerograficzną**. Podstawą badań jest analiza interferencji światła laserowego odbitego od badanej powierzchni. W obu technikach niezbędne jest obciążenie badanego obszaru w celu zobrazowania niewielkich odkształceń powierzchni materiału. Typowym sposobem obciążania materiałów kompozytowych jest wytwarzanie podciśnienia na ich powierzchni. Na skutek podciśnienia obszary zdefektowane odkształcają się odmiennie niż obszary niezdefektowane. Deformacje te mogą być uwidocznione na obrazach holograficznych lub szerograficznych w postaci serii prążków interferencyjnych otaczających wybrzuszenia powierzchni. W metodzie holograficznej analizuje się obrazy wykonane przez i po obciążeniu. W metodzie szerograficznej analizuje się obrazy elementu obciążonego przesunięte nieznacznie względem siebie. Z tego powodu metoda szerograficzna nie jest czuła na przypadkowe przesunięcie elementu lub układu pomiarowego.

Techniki interferometryczne dobrze nadają się do badań eksploatacyjnych dokonywanych bezpośrednio na statkach powietrznych. Ich podstawową zaletą jest możliwość szybkiego badania dużych, jednostronnie dostępnych powierzchni bez potrzeby ich demontażu.

10. METODA PRĄDÓW WIROWYCH

Badania nieniszczące za pomocą metody prądów wirowych przeprowadza się na materiałach wykazujących przewodnictwo elektryczne. Powstające wskutek indukcji elektromagnetycznej w obiekcie umieszczonym w zmiennym polu magnetycznym prądy nazywa się prądami wirowymi lub Foucoult. Metoda polega na wykorzystaniu zjawisk związanych z rozpiływem prądów wirowych, indukowanych w badanym obiekcie.

Nieciągłości materiałowe (np. pęknięcia) powodują zmianę rozkładu pola prądów wirowych wskutek lokalnej zmiany przede wszystkim przewodności elektrycznej oraz w przypadku obiektów ferromagnetycznych – przenikalności magnetycznej. Rozpiływ prądów wirowych zależy od mikrostrukturalnych i makrostrukturalnych własności materiału, a więc od rodzaju struktury metalograficznej, wytrzymałości, twardości, występowania wtrąceń, segregacji, pęknięć i innych wad materiałowych.

Metodą prądów wirowych bada się materiały, które są przewodnikami elektryczności, a zatem metale i stopy ferromagnetyczne oraz nieferromagnetyczne. W tych ostatnich wyróżnia się grupę stopów austenitycznych ze względu na znaczną różnicę przewodności elektrycznej w porównaniu ze stopami lekkimi (aluminiumowymi, magnezowymi).

Nieniszczące metody elektromagnetyczne (magneto-indukcyjne) w szczególny sposób nadają się do automatyzacji badania. Są coraz częściej stosowane zarówno w systemach kontroli w procesie wytwarzania jak i w kompleksowych systemach monitorowania na liniach produkcyjnych czy w trakcie eksploatacji.



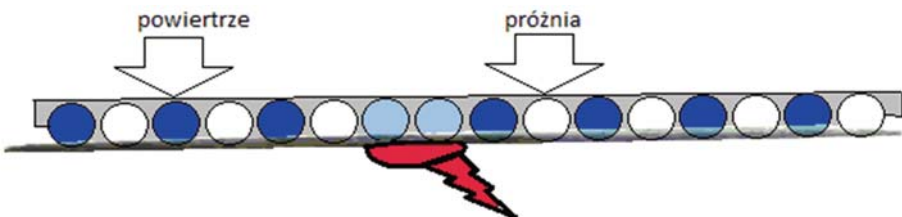
Rys. 8. Badania metodą prądów wirowych stanowiska desantowego śmigłowca

11. STRUCTURAL HEALTH MONITORING

Istnieje szereg metod zaklasyfikowanych do obszaru Structural Health Monitoring [4, 5] takich jak metody optyczne, próżniowe lub metody akustyczne wykorzystujące czujniki piezoelektryczne (PZT) [6, 7].

Jedną z najbardziej rozwijanych metod jest **metoda optyczna** [8, 9] wykorzystująca włókna światłowodowe (fiber bragg grating, fiber polarimetric sensors) jako nośnik informacji o obciążeniu konstrukcji np. ciśnieniem lub temperaturą w tym obciążeniem zmiennym. Wyróżnikiem tej metody jest możliwość umieszczania czujników wewnątrz elementu konstrukcji co daje nam możliwość badania elementu w trakcie jego. Zaletą zastosowania takiego systemu jest możliwość monitorowania elementu na całej długości włókna światłowodowego czyli możliwość monitorowania znacznych obszarów elementu.

Zalety tej nie posiada metoda próżniowa [10], w której strefa monitorowania obejmuje obszar znajdujący się bezpośrednio pod czujnikiem. Metoda jest stosowana w oparciu o czujniki zawierające komory z gazem i komory próżniowe. Czujnik reaguje na przepływ gazu do komory próżniowej, który następuje w momencie pęknięcia badanej konstrukcji i przerwania połączenia pomiędzy komorą próżniową i komorą z gazem (rysunek 9).



Rys. 9. Badania metodą prądów wirowych stanowiska desantowego śmigłowca

12. PODSUMOWANIE

W zależności od typu elementu, materiału z jakiego został on wykonany a także etapu wytwarzania jak i eksploatacji stosuje się inny zakres badań nieniszczących. W artykule przedstawiono wybrane metody oceny jakości materiałów konstrukcji lotniczych oraz przykłady wykonanych badań. Należy zaznaczyć, że z uwagi na ograniczenia poszczególnych rodzajów metod badań nieniszczących, często stosuje się równocześnie dwie lub więcej metod do oceny tego samego elementu konstrukcyjnego. Poprawia się w ten sposób wiarygodność uzyskanych wyników badań. Natomiast znajomość wpływu stwierdzanych wad na eksploatację konstrukcji wykorzystana jest do oceny jej stanu oraz ustalenia kryteriów i warunków dalszej eksploatacji elementu.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Deo R. B., Starnes J. H., Jr., Holzwarth R. C.: *Low-Cost Composite Materials and Structures for Aircraft Applications*, RTO AVT Specialists' Meeting on „Low Cost Composite Structures”, Norway, 7-11 May 2001.
- [2] Mackiewicz S., Góra G.: *Ultradźwiękowe badania konstrukcji kompozytowych w przemyśle lotniczym*, Jedenaste Seminarium Nieniszczące Badania Materiałów, Zakopane, 8-11 marca 2005.
- [3] <http://www.wavelength-ndt.com>.
- [4] Speckmann H., Henrich R.: *Structural Health Monitoring (SHM) – Overview on Technologies Under Development*, 16th World Conference on NDT, Montreal (Canada), 2004.
- [5] Boller C., Meyendorf N.: *State-of-the-Art in Structural Health Monitoring for Aeronautics*, International Symposium on NDT in Aerospace, Fürth, Germany, 3-5 December 2008.
- [6] Kumar P. P., Somasekhar B. V., Krishnamurthy C. V., Balasubramaniam K.: *In-Situ Damage Detection in Plate Structures Using PWAS and Noncontact Laser Doppler*, *Velocimeter Review of Quantitative Nondestructive Evaluation*, American Institute of Physics, Vol. 25, 2007.
- [7] Surowska B.: *Materiały funkcjonalne i złożone w transporcie lotniczym. Eksploatacja i Niezawodność*, Nr 3 (39), Lublin, 2008.
- [8] Woliński T. R., Domański A. W., Lesiak P., Szelaż M., Milenko K., Jędrzejowski K., Boczkowska A., Kurzydłowski K. J., Rajan G., Semenova Y., Farrell G.: *Fiber-Optic Smart Structures with Embedded Sensors*, 4th Integrated Optics – Sensors, Sensing Structures and Methods, Poland, March 2010.
- [9] Hill K. O., Meltz G.: *Fiber Bragg Grating Technology Fundamentals and Overview*, *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 15, No. 8, August 1997.
- [10] Wishaw M.: *Comparative Vacuum Monitoring: a New Method of In-Situ Real Time Crack Detection and Monitoring*, Asia Pacific Conference on NDT, Brisbane (Australia), 2001.

JÓZEF KRYSZTOFIK, WOJCIECH MANAJ

NON-DESTRUCTIVE TESTING TECHNOLOGY APPLICATION IN AVIATION

Abstract

Due to the increasing demand of engineering structures assessment without destroying them the field of non-destructive testing is developing in a wide range. Traditionally methods of research are: visual, dye penetrant, magnetic particle, ultrasonic and radiographic are developed for specialized techniques such as phased array ultrasonic testing or new technique of defects detection such as acoustic or thermographic method.

Non-destructive inspections are used due to the safety of the air elements and economic consequences of the structures retraction from service. Inspections are carried out both at the production stage and exploitation adjusted to specific materials.

The article presents some quality assessment methods of aircraft structures with examples of research.