

Piotr CZAJKA, Tomasz GIESKO, Wojciech MIZAK
Instytut Technologii Eksploatacji – PIB, Radom

MODELOWANIE PROCESU INSPEKЦИИ MATERIAŁÓW W PAŚMIE WIDZIALNYM I PODCZERWIENI

Słowa kluczowe

Multispektralne maszynowe widzenie, pasywna i aktywna termowizja, detekcja wad.

Streszczenie

W artykule zaprezentowano hybrydową metodę inspekcji w paśmie widzialnym i podczerwieni. W celu eksperymentalnej weryfikacji opracowanej metody zostało wykonane stanowisko badawcze. Do kontroli wizyjnej w paśmie widzialnym został zastosowany sterownik wizyjny z monochromatyczną kamerą CCD i układem panelowych oświetlaczy LED. Do kontroli w zakresie podczerwieni została zastosowana kamera termowizyjna z układem promienników podczerwieni i płytą grzewczą. Przeprowadzono analizę obszarów modelowania procesu inspekcji, uwzględniając możliwości rekonfiguracji stanowiska, stosowane metody badawcze oraz ustawienia parametrów inspekcji. Zaprezentowano analizę wyników eksperymentów dla wytypowanych obiektów z wykorzystaniem opracowanej metody. Przedstawiono obrazy uzyskane z obu torów wizyjnych, efekt nałożenia obrazów oraz wykresy profilowe wzdłuż charakterystycznych linii na termogramach.

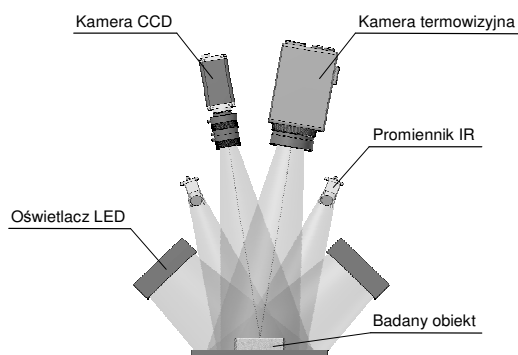
Wprowadzenie

Wśród metod pomiarowych, stosowanych w monitorowaniu procesów produkcyjnych oraz kontroli jakości wyrobów, czołowe miejsce zajmują metody

maszynowego widzenia (ang. *machine vision* – MV), których istotą jest analiza rejestrowanych obrazów. Podstawowa metoda maszynowego widzenia polega na wykorzystaniu obrazowania w paśmie widzialnym poprzez zastosowanie kamer z sensorami monochromatycznymi lub kolorowymi. Dobór odpowiedniej metody oświetlania pozwala na uwydatnienie elementów obiektu, które są istotne z punktu widzenia procesu inspekcji. Metoda maszynowego widzenia w paśmie widzialnym umożliwia wykrywanie i identyfikację wad struktur powierzchniowych, kontrolę obecności i zorientowania elementów, pomiary wymiarów geometrycznych, kontrolę jasności i koloru detali. Maszynowe widzenie wraz z rozwojem technik termowizyjnych obejmuje również obszar inspekcji w podczerwieni i jest określane jako IRMV (ang. *infrared machine vision*). Termowizja jest obrazowaniem w paśmie podczerwieni polegającym na pomiarze promieniowania cieplnego wysyłanego przez obiekt i wyznaczeniu na tej podstawie rozkładu temperatur na jego powierzchni. Metoda maszynowego widzenia w podczerwieni zapewnia monitorowanie temperatury obiektów, wykrywanie obszarów lokalnych różnic temperatury, np. stref kumulacji ciepła, a także przy zastosowaniu termografii aktywnej wykrywanie defektów w warstwie przypowierzchniowej. Bardzo dużą zaletą stosowania metod wizyjnych jest bezkontaktowy charakter pomiaru oraz możliwość jednoczesnej obserwacji całej badanej powierzchni [1, 2, 3, 4]. Metody wizyjne należą do kategorii badań nieniszczących (ang. *non-destructive testing* – NDT), które pozwalają na wykrywanie wad, nie obniżając parametrów badanego wyrobu [3]. Zastosowanie połączonej analizy skorelowanych obrazów rejestrowanych dwiema metodami (MV i IRMV) umożliwia podwyższenie efektywności procesu inspekcji. Coraz częściej w metodach optycznej inspekcji stosuje się jednoczesne obrazowanie dla różnych zakresów spektralnych, tzw. multispektralne maszynowe widzenie (ang. *multispectral machine vision*). Przykładem jest metoda i system inspekcji procesów spawania i kontroli jakości spoin [5] lub metoda inspekcji podwozi taboru kolejowego [6]. Metodę optycznej inspekcji z obrazowaniem multispektralnym stosuje się również w przemyśle spożywczym np. do kontroli jakości owoców [7, 8]. Wykorzystuje się w tym przypadku kamerę pracującą w paśmie widzialnym i bliskiej podczerwieni (ang. *near infrared* – NIR) z przełączanym układem filtrów. Opracowywane są również wersje kamer z dwoma lub więcej sensorami rejestrującymi obrazy za pomocą tego samego układu optycznego [9]. Zaletą tych rozwiązań jest brak błędów geometrycznych, jakie pojawiają się przy rejestracji obrazów z kamer dwóch torów wizyjnych. Niestety takie rozwiązanie nie jest możliwe w przypadku hybrydowej obserwacji w paśmie widzialnym i średnio- lub długofalowym zakresie podczerwieni, z uwagi na konieczność stosowania optyki wykonanej z różnych materiałów.

1. Hybrydowa metoda inspekcji

Koncepcja systemu hybrydowego polega na zastosowaniu dwóch torów wizyjnych umożliwiających jednoczesną inspekcję w paśmie widzialnym i podczerwieni (rys. 1).



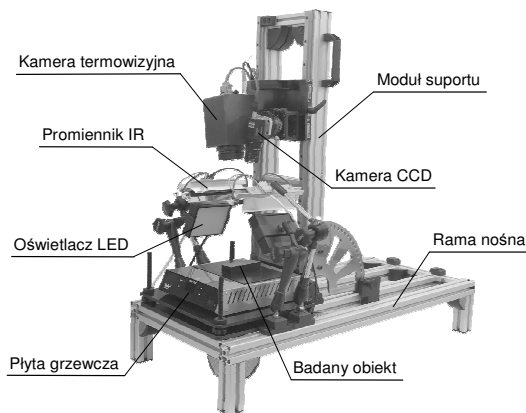
Rys. 1. Koncepcja hybrydowej metody optycznej inspekcji

Do obserwacji obszaru inspekcji wybrano kamery z sensorami matrycowymi (ang. *area scan*). W celu minimalizacji błędów perspektywy, kamery powinny być umieszczone w bliskiej odległości od siebie i ustawione kątowno tak, aby osie optyczne obu torów wizyjnych przecinały się na powierzchni badanego obiektu. Obiektywy obu kamer należy dobrać w taki sposób, aby obszary widzenia w świetle widzialnym i podczerwieni były zbliżone. Na rynku dostępny jest segment kamer termowizyjnych wyposażonych dodatkowo w aparat cyfrowy pracujący w paśmie widzialnym. Załączone oprogramowanie umożliwia nakładanie obrazu termowizyjnego na kolorowe zdjęcie w paśmie widzialnym. Możliwe jest łączenie termogramu z obrazem widzialnym, ze zmianą stopnia przenikania, tzw. fuzja obrazów (ang. *image fusion*) lub też nałożenie fragmentu termogramu, tzw. obraz w obrazie (ang. *picture in picture*) [10]. W kamerach termowizyjnych z dodatkowym torem obserwacji w paśmie widzialnym funkcje pomiarowe i analizy obrazów dotyczą jedynie termogramów w podczerwieni. Obraz w paśmie widzialnym stosowany jest pomocniczo w celu ułatwienia i przyspieszenia lokalizacji i identyfikacji kontrolowanych obiektów lub ułatwienia interpretacji wyników. Kamery termowizyjne z funkcją nakładania obrazów są najczęściej urządzeniami przenośnymi służącymi głównie do okresowej inspekcji obiektów. W prezentowanej hybrydowej metodzie inspekcji, w odróżnieniu od opisanych kamer zintegrowanych, informacja pochodząca z obu torów wizyjnych jest przetwarzana i analizowana w celu zwiększenia efektywności procesu kontroli wizyjnej. Na etapie opracowywania koncepcji hybrydowej metody inspekcji realizatorzy założyli dodatkowo konieczność za-

pewnienia ciągłej kontroli jakości w procesach produkcji poprzez zastosowanie stacjonarnych kamer i przystosowanie ich do warunków przemysłowych. Zaletą opracowanej metody jest również możliwość niezależnej zmiany kamer obu torów wizyjnych, w zależności od wymagań docelowej aplikacji, a także możliwość wymiany obiektywów w celu zapewnienia wymaganego pola widzenia. W zastosowanej metodzie do oświetlenia strefy pomiarowej w paśmie widzialnym wytypowano układ dwóch oświetlaczy LED. Inspekcja w podczerwieni może być realizowana przy zastosowaniu tzw. termografii pasywnej (ang. *passive infrared thermography*) lub termografii aktywnej (ang. *active infrared thermography*) [2, 3, 4]. W metodzie termografii pasywnej energia cieplna pochodzi wyłącznie z badanego obiektu, który pozostaje pod działaniem otoczenia lub znajduje się w normalnych warunkach pracy, bez dodatkowej stymulacji cieplnej. Istotą metody termografii aktywnej jest analiza termicznej odpowiedzi materiału na stymulację zewnętrznym źródłem energii. Po dostarczeniu energii do powierzchni materiału w postaci np. impulsu ciepła, dzięki zjawisku dyfuzji, front termiczny przesuwają się w głąb materiału. Obecność obszarów różniących się właściwościami termicznymi od obszarów jednorodnych wywołuje zmianę szybkości dyfuzji, co uwidacznia się na powierzchni w postaci zmian temperatury [1, 2, 3]. Spośród różnych technik termografii aktywnej do realizacji wytypowano metodę termografii impulsowej (ang. *pulse thermography*) [1, 3, 4, 11]. W metodzie tej pobudzenie ma charakter impulsu cieplnego, natomiast rejestracja termogramów odbywa się najczęściej w fazie chłodzenia.

2. Stanowisko badawcze



W celu weryfikacji opracowanej hybrydowej metody optycznej inspekcji wykonano eksperymentalne stanowisko badawcze (rys. 2).



Rys. 2. Stanowisko badawcze do kontroli wizyjnej w paśmie widzialnym i podczerwieni

Moduł wizyjny składa się z kamery termowizyjnej oraz kamery pasma widzialnego umieszczonych na indywidualnych stolikach obrotowych. Podstawowe parametry zastosowanych kamer zostały przedstawione w tabeli 1.

Tabela 1. Podstawowe parametry zastosowanych kamer torów wizyjnych

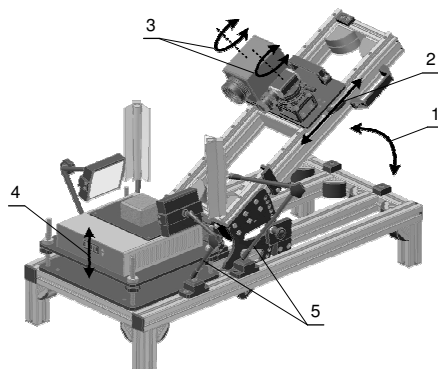
	Kamera termowizyjna	System wizyjny z kamerą pasma widzialnego
Zdjęcie		
Podstawowe parametry	rozdzielczość: 640x480 px, czułość: 40 mK @ 30°C, zakres spektralny: 7,5÷14 μm, zakres pomiarowy: -40÷1200°C	rozdzielczość: 1000x1000 px, (kadrowana na 1000x750 px) sensor monochromatyczny CCD, obiektyw C-mount

Kamera termowizyjna wyposażona jest w niechłodzoną matrycę mikrobolometryczną o rozdzielczości 640x480 pikseli. Sensor kamery pracuje w długofalowym zakresie promieniowania podczerwonego: 7,5÷14 μm [12]. Do rejestracji obrazów w paśmie widzialnym zastosowano system wizyjny z monochromatyczną kamerą o rozdzielczości 1 megapiksel [13]. Obraz z kamery był następnie kadrowany do rozdzielczości 1000x750 pikseli, tak aby zapewnić proporcje obrazu kamery termowizyjnej. Do oświetlenia obszaru obserwacji w paśmie widzialnym zastosowano dwa diodowe oświetlacze panelowe barwy białej. W celu impulsowego pobudzenia termicznego zastosowano układ dwóch promienników podczerwieni, każdy o mocy 500 W. Oświetlacze LED oraz promienniki IR zostały umieszczone na ramionach przegubowych. Dodatkowo do symulacji procesów cieplnych zachodzących podczas wytwarzania i obróbki materiałów lub symulacji warunków pracy badanych obiektów, zastosowano elektryczną płytę grzewczą o mocy 1000 W. Zakres regulacji temperatury płyty wynosi 50÷300°C. Urządzenie umożliwia grzanie próbek poprzez ich bezpośredni kontakt z powierzchnią płyty. Nagrzewanie tą metodą ograniczone jest głównie do materiałów o wysokim przewodnictwie cieplnym, takich jak wyroby metalowe.

Opracowano i wykonano układ zapewniający sterowanie procesem badawczym i zasilanie poszczególnych elementów systemu. Rozwiązanie zapewnia niezależną regulację strumienia świetlnego oświetlaczy LED (2 kanały), a także regulację mocy promienników podczerwieni za pośrednictwem regulatora fazowego (1 kanał). Układ sterujący umożliwia również niezależne lub synchroniczne wyzwalanie sprzętowe kamer obu torów wizyjnych oraz wyzwalanie impulsowe promienników IR.

3. Obszary modelowania procesu inspekcji

Konstrukcja stanowiska badawczego pozwala na zmianę konfiguracji torów wizyjnych oraz zmianę kąta obserwacji badanych próbek (rys. 3).



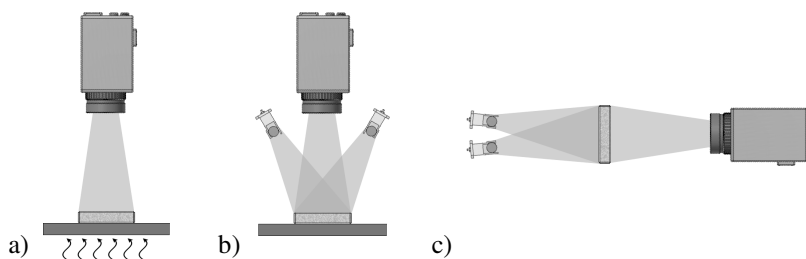
Rys. 3. Możliwości rekonfiguracji stanowiska: 1 – regulacja położenia modułu suportu $0\div 90^\circ$, 2 – regulacja położenia liniowego kamer $0,15\div 0,4$ m, 3 – regulacja położenia kąтового kamer, 4 – regulacja położenia płyty grzewczej $0\div 15$ cm, 5 – regulacja położenia oświetlaczy LED i promienników IR za pomocą ramion 3D

Moduł suportu pozwala na skokową regulację kąta nachylenia względem podstawy w zakresie $0\div 90^\circ$ z podziałką $7,5^\circ$. Moduł kamer ma zapewnioną możliwość liniowego przemieszczania się względem badanej próbki w zakresie $0,15\div 0,4$ m. Zmiana odległości od obiektu pozwala na zmianę obszaru widzenia i tym samym dostosowanie powierzchni inspekcji do wielkości próbki. Kąty widzenia zastosowanych obiektywów wynoszą $30^\circ \times 23^\circ$. Na tej podstawie wyznaczono obszary widzenia i rozdzielczości pomiarowe obu torów wizyjnych dla wybranych odległości widzenia (rys. 4) [2].

Odległość	0,15 m	0,3 m	0,4 m
Kamera termowizyjna			
Kamera CCD			

Rys. 4. Obszary widzenia i rozdzielczości pomiarowe torów wizyjnych w funkcji odległości widzenia

W module kamer zastosowane zostały precyzyjne stoliki obrotowe zapewniające zmianę kąta pomiędzy kamerami. Regulacja położenia kąтового umożliwia ustawienie osi optycznych obu torów wizyjnych w zależności od odległości widzenia. Moduł płyty grzewczej, na której umieszczany jest obiekt badań, pozwala na regulację wysokości, co gwarantuje ustawienie próbek o różnych rozmiarach w obszarze widzenia kamer. Oświetlacze LED oraz promienniki IR zostały umieszczone na ramionach przegubowych pozwalających na dużą swobodę ruchu i precyzyjne pozycjonowanie w zakresie ich zasięgu. Po ustaleniu pozycji jest ona blokowana za pomocą zacisku centralnego. Opracowana struktura stanowiska badawczego jest bardzo elastyczna, umożliwia szeroki zakres pozycjonowania poszczególnych modułów oraz pozwala na łatwą rekonfigurację. Stanowisko zapewnia prowadzenie badań z zastosowaniem metody termografii pasywnej lub aktywnej. Wykorzystanie metody termografii pasywnej jest możliwe tylko dla obiektów o temperaturze różniącej się od otoczenia w znacznym stopniu pozwalającym na wykonanie badań i późniejsze analizowanie promieniowania pochodzącego od badanego obiektu [4]. Stymulacja cieplna, w metodzie termografii aktywnej, realizowana jest za pomocą promienników podczerwieni lub płyty grzewczej (rys. 5). Dla czytelności rysunków nie zaznaczono toru wizyjnego z kamerą pracującą w paśmie widzialnym. Promienniki IR mogą być umieszczone od strony kamer [3, 4] lub w układzie przeciwnym [1, 14]. Odpowiedź obiektu na pobudzenie zewnętrzne może być zatem rejestrowana bezpośrednio na pobudzonej powierzchni (przednia projekcja – ang. *forward projection*) lub też na powierzchni przeciwnej, po przejściu fali cieplnej przez obiekt (projekcja tylna – ang. *back projection*) [11].



Rys. 5. Możliwe konfiguracje stanowiska badawczego dla metody termografii aktywnej: a) ogrzewanie za pomocą płyty grzewczej, b) ogrzewanie promiennikami IR od strony kamery, c) stymulacja cieplna promiennikami w układzie przeciwnym

Prowadzenie badań w układzie z promiennikami i kamerami umieszczonymi po jednej stronie kontrolowanej powierzchni (rys. 5b) możliwe jest zarówno w położeniu pionowym i poziomym modułu suportu. Metoda z przeciwległym umieszczeniem promienników względem kamer (rys. 5c) realizowana jest tylko dla konfiguracji stanowiska, z poziomym ustawieniem suportu względem podsta-

wy. Położenia pośrednie modułu suportu mogą być stosowane w celu minimalizacji niepożądanych odbić od powierzchni silnie refleksyjnych materiałów albo w celu ochrony kamery przed oddziaływaniem temperatury w wyniku konwekcji ciepła przy badaniach wysokotemperaturowych. Na etapie doskonalenia i weryfikacji systemu do hybrydowej kontroli wizyjnej zostanie oszacowana niepewność pomiaru za pomocą kamery termowizyjnej pracującej w docelowej konfiguracji, wykorzystując m.in. metodykę zaprezentowaną w pracy [15].

Sterowanie całym procesem pomiarowym odbywa się z poziomu komputera za pomocą opracowanej aplikacji (rys. 6). Interfejs programu można podzielić na cztery segmenty związane z obsługą wyzwalania kamer, obsługą oświetlaczy LED, promienników podczerwieni oraz sterowaniem pracą płyty grzewczej.



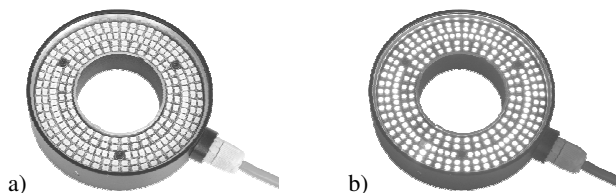
Rys. 6. Widok interfejsu aplikacji do sterowania pracą stanowiska badawczego

Aplikacja zapewnia wyzwalanie pojedynczych zdjęć lub sekwencji obrazów. Możliwe jest ustawienie zarówno parametrów czasowych, jak również regulacja nastaw oświetlaczy, promienników i płyty grzewczej. Komponenty stanowiska, które nie są używane w wybranej metodzie badawczej, mogą być wyłączone i zdemontowane, aby nie wpływały na proces pomiaru. Niezależne ustawienie czasu opóźnienia kamer i promienników w metodzie termografii aktywnej zapewnia rejestrację obrazów zarówno w fazie grzania, jak i chłodzenia.

4. Metodyka i przedmiot badań

Na opracowanym stanowisku eksperymentalnym przeprowadzono badania wytypowanych obiektów, w tym między innymi: oświetlacza pierścieniowego z diodami LED, materiałów kompozytowych z defektami w postaci delaminacji powierzchni i wad podpowierzchniowych. Do przeprowadzenia eksperymentów wytypowano konfigurację stanowiska z pionowym ustawieniem kamer (rys. 2). Badania oświetlacza pierścieniowego przeprowadzono z zastosowaniem metody termografii pasywnej, bez dodatkowej stymulacji cieplnej. Kamera pracująca w paśmie widzialnym rejestrowała emisję światła pochodzącego z załączonych diod LED. Egzemplarz oświetlacza przeznaczony do badań (rys. 7) posiadał

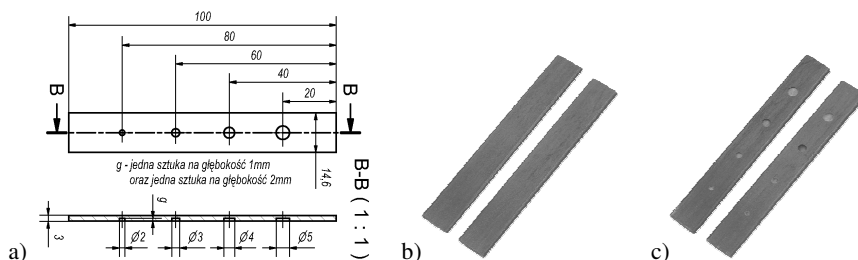
kilka uszkodzonych diod nieemitujących światła oraz kilka diod z obniżoną emisją w stosunku do wartości nominalnej.



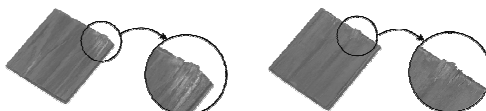
Rys. 7. Oświetlacz pierścieniowy z diodami LED: a) widok ogólny wyłączzonego oświetlacza, b) zdjęcie oświetlacza z załączonymi diodami LED

Kompleksowe badania oświetlaczy wymagają pomiaru zarówno poziomu emisji poszczególnych źródeł światła, jak i analizy rozkładu temperatury na powierzchni. Jest to szczególnie istotne dla układów z diodami LED z uwagi na dużą wrażliwość elementów półprzewodnikowych na podwyższoną temperaturę.

Przeprowadzono badania materiałów kompozytowych w postaci laminatów szklanych i węglowych. Na próbkach materiałów wykonano symulowane wady podpowierzchniowe w postaci otworów nieprzelotowych o średnicy 2÷5 mm, odległych od powierzchni czołowej o 1 i 2 mm (rys. 8).



Rys. 8. Zestawienie próbek z laminatu szklanego z wadami podpowierzchniowymi w postaci otworów nieprzelotowych: a) rysunek techniczny, b) widok powierzchni górnej, c) zdjęcie powierzchni dolnej z wykonanymi otworami



Rys. 9. Próbkę z kompozytu węglowego z wadami w postaci delaminacji warstwy powierzchniowej

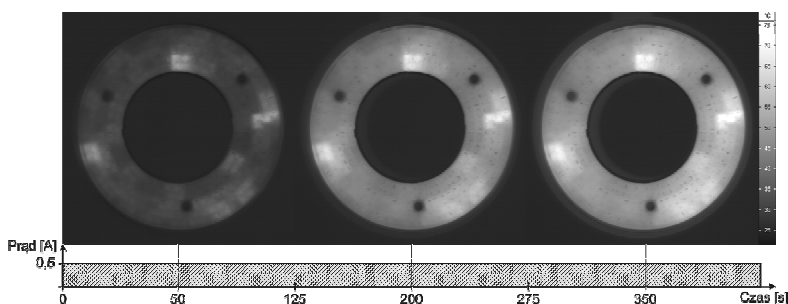
Wady tego typu są niemożliwe do wykrycia za pomocą optycznej inspekcji w paśmie widzialnym, ponieważ metoda ta ograniczona jest do defektów po-

wierzchniowych. Przeprowadzono dodatkowo badania materiałów kompozytowych posiadających wady w postaci rozwarstwienia polegającego na utracie spójności poszczególnych warstw składowych (rys. 9). Obecne na badanych próbkach wady delaminacji, pomimo iż znajdują się na warstwach zewnętrznych materiału, są mało widoczne w paśmie widzialnym.

W celu wykrycia przedstawionych defektów w materiałach kompozytowych zastosowano metodę termografii aktywnej z impulsowym pobudzeniem badanych próbek za pomocą promienników podczerwieni.

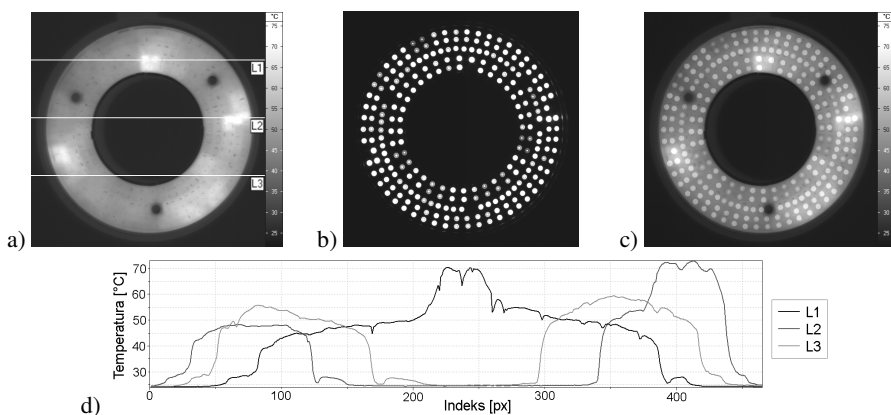
5. Analiza wyników badań

Na rysunku 10 przedstawiono sekwencję obrazów termograficznych obrazujących proces nagrzewania diod LED w oświetlaczu. Termogramy zostały zarejestrowane z czasookresem 150 sekund pomiędzy kolejnymi obrazami. Oświetlacz był zasilany ze źródła prądowego o wartości 0,5 A. Sekwencja uwidacznia proces niejednorodnego nagrzewania powierzchni czołowej oświetlacza.



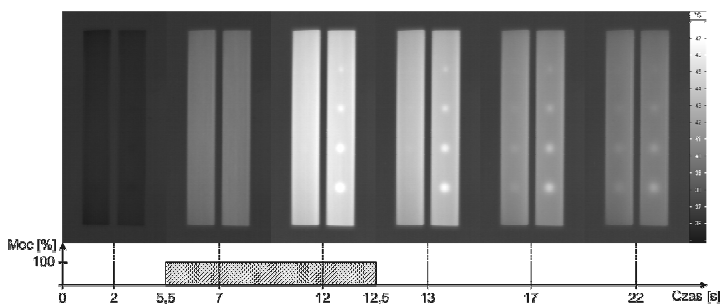
Rys. 10. Sekwencja obrazów z kamery termowizyjnej obrazujących proces nagrzewania diod LED w oświetlaczu pierścieniowym

Po nagraniu elementów świecących, obciążonych prądem nominalnym, wykonano jednoczesną rejestrację obrazów dla obu torów wizyjnych (rys. 11). Obraz z kamery CCD umożliwia ocenę emisji światła z poszczególnych diod LED. Poprzez zastosowanie operacji binaryzacji lub porównania wyników z obrazem referencyjnym możliwa jest ocena jakościowa badanego oświetlacza w zakresie promieniowania widzialnego. Obraz z kamery termowizyjnej pozwala na analizę rozkładu temperatury na powierzchni oświetlacza i wyznaczenie obszarów nadmiernej kumulacji ciepła. Wykresy profilowe wykonane wzdłuż charakterystycznych linii na zarejestrowanym termogramie przedstawiono na rys. 11d. Wynik nałożenia obrazów z obu torów wizyjnych przedstawiono na rys. 11c. Na podstawie badań zaobserwowano wpływ niesprawnego elementu na pozostałe diody w tej samej gałęzi. Uszkodzony LED powoduje zmianę punktu pracy pozostałych elementów w gałęzi, prowadząc do ich przegrzewania.



Rys. 11. Wyniki badania oświetlacza LED: a) obraz z kamery termowizyjnej, b) obraz z kamery pracującej w paśmie widzialnym, c) efekt nałożenia skorelowanych obrazów, d) profile temperaturowe wzdłuż linii L1, L2, L3

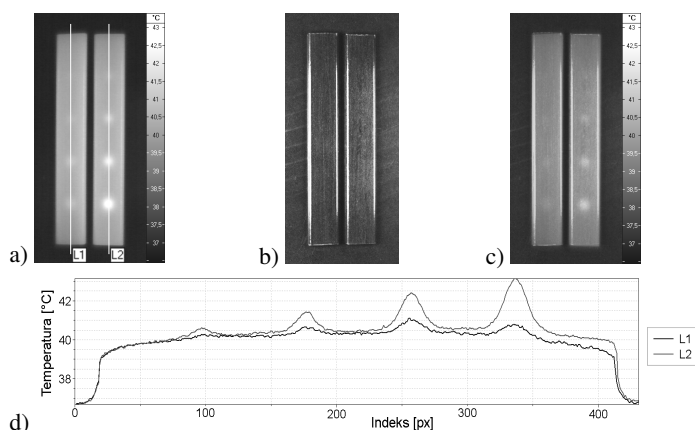
Badania materiałów kompozytowych wykonano metodą aktywnej termografii impulsowej. Czas trwania impulsu cieplnego wynosił 7 sekund przy pełnej mocy promienników równej 1000 W. Obrazy rejestrowano zarówno w fazie nagrzewania, jak i w fazie chłodzenia po wygaszeniu promienników (rys. 12).



Rys. 12. Sekwencja termogramów dla próbek z laminatu szklanego (wady podpowierzchniowe), poddanych wymuszeniu cieplnemu za pomocą promienników

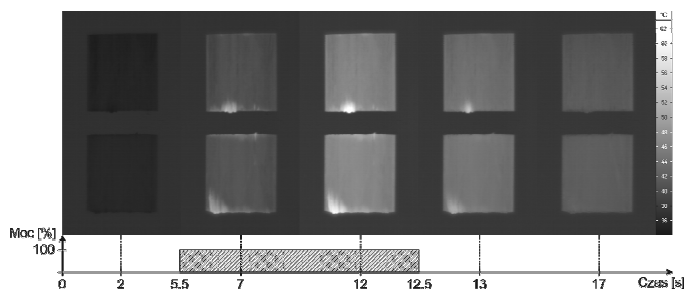
Monitorując rozkład temperatury na stygnącej powierzchni próbki można zaobserwować, iż temperatura obszarów powierzchni, pod którymi znajdują się defekty, jest wyższa od temperatury obszarów powierzchni, pod którymi materiał jest jednorodny. Dodatkowo badania wykazały, że defekty głębsze ujawniają się później i przy mniejszym kontraście temperaturowym [3].

Wykonano jednoczesną rejestrację obrazów za pomocą kamery termowizyjnej i kamery CCD (rys. 13). Do analizy wytypowano termogram, na którym uwidocznione są zarówno defekty płytkie i głębsze. Uzyskane wykresy profilowe (rys. 13d) ukazują pozycje występowania defektów na obu badanych próbkach.



Rys. 13. Wyniki badania próbek z laminatu szklanego: a) obraz z kamery termowizyjnej, b) obraz z kamery pracującej w paśmie widzialnym, c) efekt nałożenia skorelowanych obrazów, d) profile temperaturowe wzdłuż linii L1, L2

W podobny sposób wykonano badania materiałów kompozytowych z wadami w postaci delaminacji zewnętrznych warstw materiału. Sekwencję obrazów termograficznych ukazujących proces nagrzewania i chłodzenia powierzchni próbki przedstawiono na rys. 14.

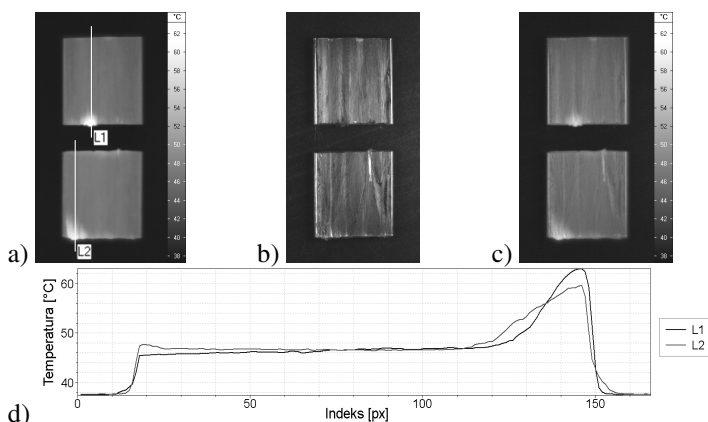


Rys. 14. Sekwencja termogramów dla próbek z kompozytu węglowego (wada delaminacji), poddanych wymuszeniu cieplnemu za pomocą promienników IR

W wyniku utraty spójności części włókien, podczas trwania impulsu cieplnego, fragmenty te nagrzewają się do wyższej temperatury. Włókna, które uległy delaminacji, nie odprowadzają bowiem energii cieplnej tak skutecznie, jak włókna ściśle przylegające do podłoża. Cechą charakterystyczną tych wad jest szybkie zanikanie obszarów o podwyższonej temperaturze po ustaniu impulsu cieplnego. Dlatego dla badanych próbek największy kontrast temperaturowy uzyskuje się w fazie nagrzewania.

Wykonano jednoczesną rejestrację obrazów za pomocą obu torów wizyjnych (rys. 15). Do analizy wybrano termogram z końcowej fazy procesu na-

grzewania impulsowego. Wykonane wykresy profilowe ukazują znaczący wzrost temperatury powierzchni materiału w obszarze rozwarstwienia (rys. 15d). Na obrazie uzyskanym za pomocą kamery CCD defekty nie są widoczne.



Rys. 15. Wyniki badania próbek z laminatu węglowego: a) obraz z kamery termowizyjnej, b) obraz z kamery w paśmie widzialnym, c) efekt nałożenia skorelowanych obrazów, d) profile temperaturowe wzdłuż linii L1, L2

Podsumowanie

Wykonane stanowisko badawcze zapewnia możliwość prowadzenia różnego rodzaju eksperymentów z zastosowaniem opracowanej hybrydowej metody inspekcji w paśmie widzialnym i podczerwieni. Obszary modelowania procesu kontroli wizyjnej obejmują zmianę konfiguracji torów optycznych poprzez zmianę odległości i kąta widzenia kamer, a także zmianę kąta obserwacji badanych próbek. Proces modelowania dotyczy również wyboru metody badawczej: termografii pasywnej lub aktywnej oraz doboru parametrów procesu inspekcji (ilość obrazów, opóźnienia kamer i promienników, czas trwania impulsu cieplnego, nastawy regulatorów). Proces modelowania obejmuje dobór metody oświetlenia w paśmie widzialnym oraz wybór konfiguracji promienników podczerwieni względem położenia kamer (projekcja przednia lub tylna).

Na podstawie analizy wyników badań stwierdzono, iż hybrydowa metoda inspekcji w paśmie widzialnym i podczerwieni, poprzez połączenie analizy skorelowanych obrazów z dwóch zakresów spektralnych, pozwala na podwyższenie efektywności procesu kontroli wizyjnej. Optyczna inspekcja oświetlaczy LED w paśmie widzialnym i podczerwieni umożliwia zarówno ocenę poziomu emisji źródeł światła, jak i analizę rozkładu temperatury na powierzchni, detekcję obszarów nadmiernej kumulacji ciepła. Hybrydowa kontrola wizyjna materiałów

kompozytowych zapewnia detekcję zarówno wad struktur powierzchniowych, jak i podpowierzchniowych.

Główne zalety opracowanej hybrydowej metody inspekcji to: zwiększenie efektywności kontroli wizyjnej, nieniszczący charakter badań, bezkontaktowy pomiar, możliwość jednoczesnej obserwacji całej badanej powierzchni.

Praca naukowa wykonana w ramach realizacji Programu Strategicznego pn. „Innowacyjne systemy wspomagania technicznego zrównoważonego rozwoju gospodarki” w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka.

Bibliografia

1. Więcek B., De Mey G.: Termowizja w podczerwieni Podstawy i zastosowania. Wydawnictwo PAK, Warszawa 2011.
2. Minkina W.: Pomiary termowizyjne – przyrządy i metody. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2004.
3. Oliferuk W.: Termografia podczerwieni w nieniszczących badaniach materiałów i urządzeń. Biuro Gamma, Warszawa 2008.
4. Szczepanik M., Stabik J., Wróbel G., Wierzbicki Ł.: Wykorzystanie systemów termowizyjnych do badań materiałów polimerowych. Modelowanie inżynierskie, Gliwice 2008, tom 5, zeszyt 36, s. 279–286.
5. Projekt Badawczy Zamawiany PBZ-10 „Metody i urządzenia do wspomagania systemów jakości w procesach wytwarzania i eksploatacji”. Sprawozdanie końcowe, Instytut Technologii Eksploatacji – PIB, Radom 2009.
6. Ahuja N., Barkan C.: Machine Vision for Railroad Equipment Undercarriage Inspection Using Multi-Spectral Imaging. Final Report for High-Speed Rail IDEA Project 49, USA, 2007.
7. Unay D., Gosselin B., Kleynen O., Leemans W., Destain M., Debeir O.: Automatic grading of Bi-colored apples by multispectral machine vision. Computers and Electronics in Agriculture, 2011, Volume 75, p. 204–212.
8. Aleixos N., Blasco J., Navarrón F., Molto E.: Multispectral inspection of citrus in real-time using machine vision and digital signal processors. Computers and Electronics in Agriculture, 2002, Volume 33, p. 121–137.
9. Provides simultaneous images of both the visible and near-infrared light spectrums, JAI Company, <http://www.jai.com>.
10. Katalog produktów firmy Flir, <http://www.flir.com>.
11. Projekt Badawczy Zamawiany PW-004/ITE/02/2004 „Budowa systemu pomiarowego do badań nieniszczących techniką termografii aktywnej”. Sprawozdanie końcowe, Centralny Instytut Ochrony Pracy – PIB, Warszawa 2005.
12. VarioCAM hr head User’s Manual, InfraTec, <http://www.infratec.de>.
13. CV-5000 Series User’s Manual, Keyence, <http://www.keyence.eu>.

14. Muzia G., Rdzawski Z., Rojek M., Stabik J., Wróbel G.: Diagnostyka termowizyjna stopnia degradacji zmęczeniowej kompozytów epoksydowo-szklnych. Modelowanie inżynierskie, Gliwice 2007, tom 3, zeszyt 34, s. 99–104.
15. Minkina W., Dudzik S.: Infrared thermography – errors and uncertainties, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 2009.

Recenzent:

Waldemar MINKINA

Modelling the optical inspection process in the visible and infrared band

Key words

Multi-spectral machine vision, passive and active infrared thermography, fault detection.

Summary

The article presents a hybrid optical inspection method in the visible and infrared band. The research stand was fabricated for the experimental verification of the developed method. A vision controller with a monochromatic CCD camera and a system of front LED lighting were used for optical inspection in the visible band. The thermovision camera with a system of infrared lamps and heating plate were used for inspection in the infrared band. The modelling areas of the inspection process were analysed, including features for the reconfiguration of the stand, the research methods applied, and the setting of the inspection parameters. The analysis of the results is presented for selected objects with the use of the developed method. The images from both vision channels and the effect of overlay images and profile charts along representative lines on thermal images are also presented.

