

OKREŚLANIE WYMIARU DEFECTÓW PODPOWIERZCHNIOWYCH METODĄ AKTYWNEJ TERMOGRAFII - BADANIA EKSPERYMENTALNE

Sławomir GRYŚ

Wydział Elektryczny, Politechnika Częstochowska
tel.: 34 3250883, e-mail: grys@el.pcz.czest.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki prac eksperymentalnych dotyczących określania wybranych cech wad materiałowych lub niejednorodności w wewnętrznej strukturze badanych materiałów. Jako metodę badań nieniszczących wybrano aktywną termografię w podczerwieni. Wady zostały ujawnione poprzez analizę pola temperatury przedniej powierzchni badanego materiału, który został wzbudzony energetycznie poprzez oświetlenie lampami halogenowymi. Do wykrycia defektów na zarejestrowanym termogramie użyto autorskiej techniki usuwania efektu niejednorodnego tła połączoną z segmentacją termogramu. Analizowano dokładność określenia wymiarów poprzecznych wad wewnątrz badanej płytki pleksiglasu, uwzględniając następujące czynniki: głębokość defektu, wartość emisyjności powierzchni wprowadzanej przez operatora kamery termowizyjnej jako parametru modelu wyznaczania temperatury, wariant metody filtrowania służącej do usuwania efektu niejednorodności nagrzewania badanej powierzchni.

Słowa kluczowe: badania nieniszczące, aktywna termografia, przetwarzanie obrazów, segmentacja.

1. WPROWADZENIE

Wraz z rozwojem przemysłu, a szczególnie przemysłu komunikacyjnego, tj.: lotniczego, morskiego i motoryzacyjnego zauważalny jest wzrost zainteresowania materiałami o dużej wytrzymałości i jednocześnie niewielkim ciężarze, takimi jak: kompozyty, struktury wielowarstwowe lub struktury typu „plaster miodu”. Spełnianie ostrych wymogów bezpieczeństwa ludzi nakłada konieczność rygorystycznej kontroli jakości materiałów i podzespołów stosowanych do produkcji, zarówno podczas ich wytwarzania jak i później eksploatacji.

1.1. Wady materiałowe

Zależnie od umiejscowienia względem powierzchni obiektu, wady można podzielić na powierzchniowe, podpowierzchniowe i wewnętrzne. Innym kryterium podziału jest kształt defektu: płaski lub objętościowy, regularny lub nieregularny. Z punktu widzenia wytrzymałości materiałów najbardziej niebezpieczne są nierównomierności płaskie, zorientowane równoległe do powierzchni obiektu. Im bliżej powierzchni, tym mniejsza wartość naprężenia jest wystarczająca do spowodowania pęknięcia struktury. Szczególnie groźne są zanieczyszczenia metaliczne i niemetaliczne o ostrym kształcie, rozklejenia, rozwarstwienia. Inne wady materiałowe to: geometryczne nieciągłości związane ze zmianą grubości, kształtu lub

wnętkami pochodzącymi z produkcji lub zmęczenia materiału. Czynnikiem szkodliwym oddziałyującym na obiekt podczas eksploatacji są obciążenia statyczne, dynamiczne i wstrząsowe, powodowane przez siły zewnętrzne, erozję, szok termiczny, reakcje chemiczne lub tarcie mechaniczne.

1.2. Badania nieniszczące w defektoskopii

Badania nieniszczące wykorzystują metody, które nie wpływają na zdolności wytrzymałościowe i eksploatacyjne badanych obiektów, a podczas badania próbka nie ulega zniszczeniu. Zazwyczaj, pierwszym poziomem procedury testowania jest kontrola wizualna wykonywana przez operatora lub zamontowane na linii produkcyjnej wyspecjalizowane systemy wizyjne rejestrujące w zakresie światła widzialnego. W kolejnej fazie obiekty są sprawdzane pod kątem ukrytych, wewnętrznych wad konstrukcyjnych i materiałowych przy użyciu powszechnie akceptowanych technik nieniszczących, np. metody radiograficznej, ultrasonograficznej, aktywnej termografii lub innych. Określenie najważniejszych parametrów wykrytych wad jest niezbędne do poznania powodów ich wystąpienia oraz w celu podjęcia decyzji o wycofaniu z dalszej eksploatacji. Oceniane parametry defektu obejmują zazwyczaj głębokość, na jakiej jest defekt zlokalizowany, jego rozmiar, kształt, rodzaj oraz właściwości fizyczne. Aby skutecznie przeprowadzić test nieniszczący, konieczny jest dobór metody badań właściwej dla rodzaju badanego materiału. Dla materiałów o niskiej przewodności termicznej dedykowaną metodą diagnostyczną jest aktywna termografia w podczerwieni. Jej podstawy teoretyczne, zalety oraz ograniczenia, typowe zastosowania scharakteryzowano w wielu pracach, m.in. [1-4].

2. AKTYWNA TERMOGRAFIA METODĄ NDT

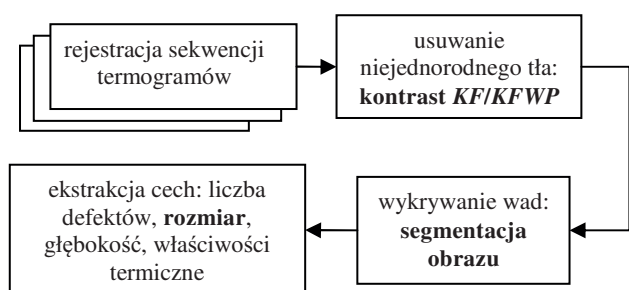
Zarówno w teorii jak i w praktyce inżynierskiej powszechnie przyjął się podział na termografię w podczerwieni pasywną i aktywną. W obu przypadkach za pomocą specjalistycznej kamery rejestrowany jest rozkład przestrzenny pola temperatury wybranej powierzchni obiektu poddanego inspekcji. Niewątpliwą zaletą termografii jest nieinwazyjność, bezpieczeństwo personelu oraz możliwość badania znacznych powierzchni w krótkim czasie. Wadą jest nadal znaczny koszt aparatury, mimo że w przeciągu dziesięciolecia uległ znacznemu obniżeniu.

2.1. Skrócony opis metody

W termografii aktywnej konieczne jest dostarczenie do obiektu energii i rejestrowanie jego odpowiedzi termicznej na tak wygenerowane zaburzenie stanu równowagi termodynamicznej. Najczęstsze techniki stymulacji to napromieniowanie, podgrzewanie poprzez fizyczny kontakt ze źródłem ciepła lub przemiana energii mechanicznej drgań w energię wewnętrzną a w rezultacie wzrost temperatury. W zależności od stanu i właściwości powierzchni ciał nieprzezroczystych część promieniowania jest pochłaniana przez strukturę materiału. Jeśli materiał badany i materiał defektu różnią się pod względem właściwości termicznych, to wówczas zmienia się tempo i kierunek dyfuzji cieplnej. Przykładowo, jeśli wada w stosunku do badanego materiału jest termoizolatorem, to ciepło spiętrza się w obszarze nad defektem a temperatura jest wyrównywana w kierunku prostopadłym do promieniowania. Temperatura powierzchni materiału nad defektem będzie wyższa niż dla obszarów bez defektów. W odwrotnym przypadku, gdy wada dobrze przewodzi ciepło, obserwuje się wolniejszy wzrost temperatury w obszarze nad defektem w porównaniu do obszaru referencyjnego, tj. bez defektu. Taka anomalia pola temperatury na powierzchni badanego materiału potwierdza obecność defektu w jego wewnętrznej strukturze.

2.2. Wyniki dotychczasowych badań

Zautomatyzowanie zadania detekcji wraz z oceną ilościową parametrów wykrytych defektów wymagało doboru technik przetwarzania zbioru danych pomiarowych w postaci sekwencji termogramów. W pracy [5] zaproponowano autorski algorytm przetwarzania danych o następujących cechach użytkowych: analiza sekwencji termogramów w czasie, wykrycie defektów, automatyczne zliczenie i raportowanie defektów, określenie na jakiej głębokości się znajdują oraz jaki mają charakter cieplny (przewodnik czy izolator) w porównaniu do materiału badanego, będącego materiałem odniesienia. Poszczególne części algorytmu zostały poddane walidacji na danych symulacyjnych uzyskanych z jednowymiarowego modelu analitycznego oraz trójwymiarowego modelu numerycznego oraz rzeczywistych danych z eksperymentu przy założeniu stałego wymuszania cieplnego, tzw. step heating. Badano wpływ następujących czynników na zdolność detekcji dokładność oceny parametrów defektu: nierównomierność nagrzania badanego obiektu, czas nagrzewania, adekwatność modelu analitycznego, dokładność określania głębokości defektu [6-8]. Algorytm przetwarzania danych został m.in. zaimplementowany w środowisku Matlab w ramach autorskiego oprogramowania "IR Defect Detector" [9]. Uproszczoną wersję łańcucha przetwarzania danych pomiarowych zilustrowano na rysunku 1, na którym pogrubiono elementy bezpośrednio związane z tematyką niniejszego artykułu.



Rys. 1. Uproszczony łańcuch przetwarzania danych pomiarowych

Opracowane autorskie rozwiązanie różni się poszczególnymi technikami użytymi w kolejnych etapach przetwarzania, lecz same etapy i ich kolejność są zbliżone do metodyki podanej w pracy [10].

W dalszej części artykułu skoncentrowano się na dokładności określenia wymiaru poprzecznego (średnicy) wykrytych wad materiałowych. Przeprowadzono badania eksperymentalne w celu potwierdzenia wniosków z symulacyjnych badań modelowych opublikowanych w pracy [11]. Dla zachowania przejrzystości dalszego wywodu przytoczono za [5] skrócony opis techniki poprawy kontrastu KF i $KFWP$ oraz filtracji wygładzającej stosowanych do przetwarzania pojedynczego termogramu.

2.3. Kontrast typu KF i $KFWP$

Kontrast filtrowany KF [12] oparty jest na zasadzie odejmowania dwóch obrazów, jak w równaniu (1), gdzie operacja jest wykonywana dla każdego piksela obrazu [5].

$$KF = T - filter(T) \quad (1)$$

Od oryginalnego obrazu termicznego (termogramu) odejmowany jest ten sam obraz po jego rozmyciu filtrem wygładzającym. Zadaniem filtru jest przede wszystkim estymacja tła, dla przypadku jak gdyby w próbce nie występowały defekty. Po odjęciu otrzymanego tła znika również niepożądany efekt niejednorodnego pola temperatury związany ze sposobem dostarczania energii do materiału. Upraszcza to znacznie wymagania co do jakości źródeł wymuszenia cieplnego. W najprostszym przypadku wystarczy użycie klasycznych lamp żarowych lub halogenowych. W niniejszej pracy do filtracji zastosowano dwuwymiarowe jądro Gaussa. Jego notacja wektorowa jest wyrażona zależnością (2) [5],

$$f(\mathbf{i}, \mathbf{B}) = \exp\left(-\frac{1}{2} \cdot (\mathbf{i} - \boldsymbol{\mu})^T \mathbf{cov}^{-1} (\mathbf{i} - \boldsymbol{\mu})\right) \quad (2)$$

gdzie \mathbf{i} - wektor niezależnych zmiennych, $\boldsymbol{\mu}$ - wektor wartości centralnych (środkowych), \mathbf{B} - wektor szerokości, \mathbf{cov} - macierz kowariancji. Ww. parametry są zdefiniowane zależnością (3), gdzie r_{ij} jest miarą korelacji zmiennych przestrzennych i, j określonych w przedziale $i = \langle 1 \div i_{max} \rangle$ i odpowiednio $j = \langle 1 \div j_{max} \rangle$. Dla uproszczenia przyjęto symetrię kształtu krzywej maski filtru $B = B_i = B_j$ oraz $i_{max} = 7 \cdot B + 1$, stąd $j_{max} = i_{max}$ [5].

$$\mathbf{i} = \begin{bmatrix} i \\ j \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{\mu} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} i_{max} \\ j_{max} \end{bmatrix} \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} B_i \\ B_j \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{cov} = \begin{bmatrix} B_i^2 & r_{ij} \cdot B_i \cdot B_j \\ r_{ij} \cdot B_i \cdot B_j & B_j^2 \end{bmatrix}$$

W celu zachowania jednostkowego wzmocnienia filtra dla jednorodnego tła konieczne jest normowanie współczynników filtra zgodnie z zależnością (4), gdzie i, j oraz B są tu skalarami [5].

$$f_{norm}(i, j, B) = \frac{f(i, j, B)}{\sum_{i=1}^{i_{max}} \sum_{j=1}^{j_{max}} f(i, j, B)} \quad (4)$$

Filtracja jest realizowana jako dwuwymiarowy, dyskretny spłot funkcji $f_{norm}(i, j, B)$ z odczytaną temperaturą.

Kontrast filtrowany względny przyrostowy $KFWP$ wyrażony jest zależnością (5) [5],

$$KFWP = \frac{T - filter(T)}{filter(T) - T_{ref}} \quad (5)$$

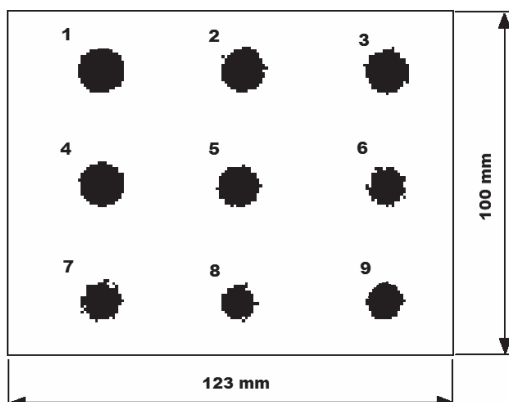
gdzie temperatura T_{ref} jest obliczana jako średnia arytmetyczna z termogramu referencyjnego, sprzed fazy nagrzewania. Zaletą $KFWP$ w porównaniu do KF jest zdolność do detekcji znaku współczynnika niedopasowania cieplnego, tzw. mismatch factor, co dostarcza informacji o właściwościach cieplnych defektu względem materiału referencyjnego. Kontrast $KFWP$ jest także niezbędny jako element przygotowania danych pomiarowych do szacowania głębokości defektu. Można wykazać, że zastosowanie $KFWP$ sekwencji termogramów w czasie, a następnie ekstrakcja danych z poszczególnych termogramów dla pikseli stanowiących obszary nad defektami generuje przebieg zmian temperatury w czasie zależny jedynie od wybranych parametrów. Redukuje to znacznie złożoność problemu. Głębokość określa się przez dopasowanie krzywej eksperymentalnej do modelu analitycznego lub w sposób uproszczony. Więcej szczegółów poświęcono tym zagadnieniom w pracach [6-7].

3. OKREŚLANIE WYMIARU DEFEKTÓW

Zgodnie z rysunkiem 1 kolejną techniką po kontraście jest segmentacja obrazu. Zakładając, że istnieją tylko dwie klasy, sprowadza się ona do binaryzacji obrazu. Każdy piksel jest klasyfikowany jako element tła, tzn. obszaru wolnego od defektów lub obszaru nad wewnętrznym defektem. Optymalną wartość progów binaryzacji dla całego termogramu wyznacza się metodą Otsu. W wyniku segmentacji otrzymuje się jednorodne tło oraz wyróżnione obszary leżące nad defektami. Wymiar defektu jest wyznaczany z odczytanej liczby pikseli i rozdzielczości geometrycznej termogramu, zależnej od optyki kamery i jej odległości od badanego obiektu.

3.1. Próbkę testowa

Do testów przygotowano próbkę z pleksiglasu. Od dołu wywiercono 9 otworów imitujących rzeczywiste defekty w kształcie półotwartego cylindra o średnicy 10 mm każdy, rozmieszczonych na różnych głębokościach. Aby zapewnić właściwe warunki inspekcji kamerą termowizyjną, frontálną powierzchnię próbki pokryto czarną, matową farbą o wysokiej emisyjności. Przykładowy efekt zastosowania kontrastu filtrowanego i segmentacji przedstawia rysunek 2.



Rys. 2. Efekt segmentacji z widocznymi 9 obszarami nad defektami [5]

Można zauważyć, że mimo iż średnica defektów była jednakowa, uwidocznione obszary nad defektami nie mają takich samych wymiarów. Jest to spowodowane wpływem głębokości defektu na wartość temperatury powierzchni i właściwościami metody wyznaczania globalnego progu binaryzacji dla całego termogramu. W rezultacie otrzymuje się zafałszowanie wymiaru defektu. Wada nr 9 jest fizycznie głębiej położona w porównaniu do wady nr 8 itd., a defekt 1 leży najbliższej powierzchni, stąd średnice defektów o wyższych numerach są niedoszacowane. Efekt końcowy jest zależny również od relacji parametru B filtru wygładzającego użytego do wyznaczania kontrastu do wyznaczanego rozmiaru.

3.2. Dyskusja wyników

W dalszej części artykułu dokonano próby oceny dokładności wyznaczania średnicy każdej z 9 wad. Uwzględniono przy tym następujące czynniki: głębokość defektu, wartość emisyjności ε powierzchni wprowadzanej przez użytkownika jako parametr wejściowy do modelu wyznaczania temperatury w kamerze termowizyjnej, wartość współczynnika B filtru oraz typ zastosowanej techniki kontrastu KF lub $KFWP$. Dla przyjętej optyki kamery oraz jej odległości od obiektu jeden piksel pokrywa obszar 0,78 mm x 0,78 mm, co dla średnicy defektów 10 mm odpowiada to 12,8 \approx 13 pikselom.

Tablica 1. Wymiar poziomy defektów, ilość pikseli a) emisyjność $\varepsilon=0,98$ (bliska wartości prawdziwej)

$t=120$ s		nr defektu								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
KF	$B=5$	14	13	13	13	12	11	10	9	10
$KFWP$		14	14	14	13	12	11	10	9	10
KF	$B=10$	16	15	14	16	14	11	12	9	10
$KFWP$		16	16	15	16	14	11	11	9	10
KF	$B=15$	17	18	16	16	16	13	13	12	12
$KFWP$		17	18	16	16	16	13	13	12	12
KF	$B=20$	17	16	17	17	16	13	14	12	11
$KFWP$		17	16	17	17	16	13	14	12	12

b) emisyjność $\varepsilon=0,50$ (znacznie zaniżona)

$t=120$ s		nr defektu								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
KF	$B=5$	13	14	13	13	14	12	10	9	9
$KFWP$		13	14	13	13	14	12	10	9	9
KF	$B=10$	16	15	18	14	14	11	11	9	10
$KFWP$		16	15	18	14	14	11	11	9	10
KF	$B=15$	17	17	16	18	16	13	16	12	12
$KFWP$		17	17	16	18	16	13	16	12	12
KF	$B=20$	18	17	16	17	17	13	13	12	11
$KFWP$		18	17	17	17	17	13	13	11	11

W tablicy 1 przedstawiono wyniki analizy pojedynczego termogramu zarejestrowanego po czasie 120 s od momentu załączenia zewnętrznego wymuszenia cieplnego, wystarczającego do uwidocznienia wszystkich 9 defektów. Wartości zacieniowane obejmują przedział

[11÷15] pikseli, czyli odpowiadający ± 20 % wartości rzeczywistej. Dodatkowo, przez pogrubienie wyróżniono wartości z przedziału $\langle 12,14 \rangle$, tj. różniące się nie więcej niż o 1 piksel.

Wnioski z eksperymentu otrzymane dla badanej próbki są następujące:

- dokładność określania rozmiaru defektów w niewielkim stopniu zależy od wartości emisyjności ustawionej przez operatora kamery termowizyjnej.
- zastosowanie *KFWP* w miejsce *KF* nie spowodowało znaczącej różnicy w dokładności określania wielkości defektu;
- dokładność określania rozmiaru defektu prawie nie zależy od wartości *B* dla przyjętego w eksperymencie zakresu w relacji do badanej średnicy;
- wady znajdujące się głębiej pod powierzchnią zostały poprawnie scharakteryzowane przyjmując wyższe wartości parametru *B*; dobierając *B* indywidualnie dla każdego defektu można kompensować efekt niedoszacowania lub przeszacowania poprzecznego wymiaru wady (tu: średnicy), co wskazuje na wpływ głębokości defektu na dokładność metody.

4. WNIOSKI KOŃCOWE

Z przeprowadzonej analizy wynikają wnioski potencjalnie istotne dla praktyki diagnostyki termowizyjnej. Zaproponowana metoda przetwarzania termogramów jest niewrażliwa nawet na duże niedoszacowanie emisyjności badanej powierzchni materiału, jako parametru koniecznego do wprowadzenia do kamery w celu wyznaczenia rozkładu temperatury. Podobnie niedopasowanie parametru *B* filtra wygładzającego Gaussa nie ma istotnego wpływu na dokładność, w przeciwieństwie do głębokości defektu. Im defekt położony głębiej tym wymagana jest wyższa wartość *B* do prawidłowego oszacowania wymiaru. W przypadku wykrycia kilku defektów wartość *B* filtra lub wartość progu segmentacji powinna być dobierana lokalnie dla obszaru obejmującego pojedynczy defekt. Sugeruje się również użycie formuły *KF* zamiast *KFWP* jako techniki łatwiejszej w implementacji i w rezultacie szybszej, gdy nie jest wymagane wyznaczenie głębokości defektu, będącego kolejnym parametrem opisującym wadę.

W przyszłości, planuje się udoskonalenie metody przetwarzania danych pomiarowych, poprzez adaptacyjny dobór parametru filtra wygładzającego lub progu segmentacji, tak aby zminimalizować błąd szacowania wymiaru defektu. Istotna będzie również walidacja metody dla rzeczywistych defektów.

5. BIBLIOGRAFIA

1. Bagavathiappan S. i in.: Infrared Thermography for Condition Monitoring – A Review, *Infrared Physics & Technology* 60, Elsevier 2013, s. 35-55.
2. Milovanovic B, Banjad Pecur I.: Review of Active IR Thermography for Detection and Characterization of Defects in Reinforced Concrete, *J. Imaging* 2 (11), 2016, doi: 10.3390/jimaging2020011.
3. Ibarra-Castanedo C.: Comparative Study of Active Thermography Techniques for the Nondestructive Evaluation of Honeycomb Structures, *Research in Nondestructive Evaluation* 1 (20), 2009, doi: 10.1080/09349840802366617.
4. Wiggerhauser H.: Active IR-applications in Civil Engineering, *Infrared Physics & Technology*, 3-5 (43), 2002, s. 233-238.
5. Gryś S.: Filtered Thermal Contrast Based Technique for Testing of Material by Infrared Thermography, *Opto-Electronics Review*, 2 (19), 2011, s. 234–241.
6. Gryś S., Minkina W., Vokorokos L.: Automated Characterisation of Subsurface Defects by Active IR Thermographic Testing – Discussion of Step Heating Duration and Defect Depth Determination, *Infrared Physics & Technology* (68), 2015, s. 84-91.
7. Gryś S.: Określanie czasu termicznego wymuszenia skokowego w celu wykrycia zmiany grubości pierwszej warstwy struktury dwuwarstwowej, *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej*, 2014 (38), s. 19-22.
8. Gryś S., Minkina W.: Wyznaczanie granic defektów podpowierzchniowych metodą aktywnej termografii - badania modelowe”, *Electrical Review*, 4 (89), 2013, s. 221-223.
9. Gryś S.: Integration of Some Techniques of Thermal Image Processing in Software IR Defect Detector, XLVI Międzyuczelniana Konferencja Metrologów, Łągowo /Zielona Góra, wrzesień 2015, s. 17-18.
10. Venegas P. i in.: Image and Data Processing Techniques Applied to Infrared Thermographic Non-Destructive Inspections of Aeronautical Composite Components, 4th Int. Symp. on NDT in Aerospace 2012 - We.2.A.1.
11. Gryś S., Vokorokos L., Borowik L.: Size Determination of Subsurface Defect by Active Thermography – Simulation Research, *Infrared Physics & Technology* (62), 2014, s. 147-153.
12. Gryś S.: New Thermal Contrast Definition for Defect Characterisation by Active Thermography, *Measurement* (45), 2012, s. 1885-1892.

DETERMINING THE DIMENSION OF SUBSURFACE DEFECT BY ACTIVE IR THERMOGRAPHY - EXPERIMENTAL RESEARCH

Nowadays, it is increasing the use of materials such as composites and multilayered or honeycomb structures, due to their good physical properties in relation to the low weight. Its application in very demanding industry branches as aerospace, naval or automotive imposes the necessity of rigorous examination all parts during production phase and exploitation. The nondestructive testing is suggested in the cases when there is no permission to stop the production line or object under examination must remain in service with no changed properties. In this paper there was presented the results of experimental research on determination of transverse size of internal nonuniformities in tested material revealed by active infrared thermography. Defects were shown by analyzing the temperature field of the front surface of the material, which was heated with halogen lamps. The background estimation and thermogram segmentation were used for defect detection. The following factors having an impact on the accuracy of defect size estimation were considered: defect depth, emissivity introduced as an input parameter of thermovision camera system, the type of the smoothing filter and its parameter.

Keywords: nondestructive testing, active thermography, image processing, segmentation.