

## DIAGNOZOWANIE STANU EKSPLOATOWANYCH ŁOPATEK TURBINY GAZOWEJ

Józef BŁACHNIO\*, Mariusz BOGDAN\*\*

\*Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, ul. Księcia Bolesława 6  
01-494 Warszawa, [jozef.blachnio@itwl.pl](mailto:jozef.blachnio@itwl.pl)

\*\*Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny, Katedra Automatyki i Robotyki  
ul. Wiejska 45c, 15-351 Białystok, [marbog@doktoranci.edu.pl](mailto:marbog@doktoranci.edu.pl)

### Streszczenie

W artykule przedstawiono wybrane aspekty diagnostyki turbiny gazowej pod kątem oceny stanu łopatek pracujących w środowisku spalin. Zaprezentowano wyniki opracowywanej metody oceny stanu łopatek turbiny gazowej na podstawie przetwarzania i analizy obrazów ich powierzchni. Poruszono, także problematykę akwizycji obrazów za pomocą detektora światłoczułego – matrycy CCD w oparciu o fizyczne podstawy detekcji i rejestracji obrazów w zakresie widzialnym fali elektromagnetycznej.

Za pomocą mikroskopu skaningowego, na zglądach metalograficznych, obserwowano mikrostrukturę superstopów (żarowytrzymałych i żaroodpornych). Dzięki czemu uzyskano dokładną informację dotyczącą zmian strukturalnych zarówno warstwy wierzchniej jak i rdzenia łopatek powstałych w czasie eksploatacji. Na podstawie określonych związków i zależności pomiędzy zmianą barwy powierzchni łopatki turbiny gazowej, a zmianą mikrostruktury jej materiału, wskutek oddziaływania czynnika roboczego o wysokiej (nadkrytycznej) temperaturze możliwe będzie zwiększenie czułości i niezawodności diagnozowania stanu badanego obiektu technicznego. Ponadto przedstawiono metodę skanowania zarejestrowanych obrazów powierzchni łopatek eksploatowanych pod kątem określenia wielkości obszaru przegrzanego.

Słowa kluczowe: łopatka turbiny gazowej, superstopy, matryca CCD, obraz cyfrowy.

### DIAGNOSING OF CONDITION OF OPERATING GAS-TURBINE BLADES

#### Summary

In this article presented are aspects chosen of diagnostics of gas turbine from the point of view of evaluation of condition of working blades, working in specified environment. Presented are results of the prepared method of the evaluation of turbine blade condition on the grounds of processing and analysis of images of their surface. In addition, raised is the problem of data acquisition with the use of photoelectric light sensor (matrix CCD) by showing the physical basis of detection and recording images in a visible range of electromagnetic wave.

The microstructure of superalloys (high-temperature creep resisting and heat-resisting alloys) was tested on the special preparation of metallographic with the aid of scanning microscope. Thanks to these investigations, accurate information about microstructure changes of surface layer as well as core blade during operating process, was obtained. Change of colour of blade turbine surface and change of microstructure of its material, as a result of working factor such as high temperature (supercritical temperature) it would be possible to increase sensitivity and reliability of diagnostics of operational state of tested technical object. Moreover, the method of surface scanning of recorded images of turbine operational blades with a view to evaluation of overheated area was presented.

Key words: gas-turbine blades, superalloys, CCD matrix, digital image.

#### 1. ISTOTA PODJĘTEGO PROBLEMU DIAGNOSTYCZNEGO

Turbiny gazowe zamieniają energię ciepłą spalin powstających w energię mechaniczną. Elektrownie gazowe powstałe na bazie turbin gazowych mogą nawet zawierać zestawy kilku turbin gazowych. Rola ich jest nie do przecenienia

i nie ogranicza się tylko do energetyki, turbiny gazowe występują także w tak ważnej dziedzinie gospodarki jak transport: wodny (oceaniczny, morski, rzeczny), lądowy (drogowy, kolejowy); powietrzny (silnik turbowentylatorowy, turbośmigłowy, turbodrutowy, śmigłowcowy). Turbiny gazowe mają również zastosowanie: w pojazdach wojskowych (lądowych, wodnych,

powietrznych), w urządzeniach pomocniczych: turbosprężarkach doładowujących silnik tłokowy, rozrusznikach głównych silników lotniczych [1]. Obecnie ocenę stanu łopatek turbiny gazowej poddanych obciążeniom cieplnym dokonuje się w procesie eksploatacji metodą wizualną na podstawie ich obrazów powierzchni i porównanie tego obrazu z wzorcowymi powierzchniami łopatek. Takie kryteria oceny stanu są bardzo subiektywne, gdyż zależą od wiedzy i stanu wzroku diagnosty. Weryfikację decyzji diagnosty realizuje się metodą niszczącą prowadząc badania metalograficzne. Jak dotąd nie opracowano nieniszczącej metody badań stopnia przegrzania materiału łopatek opartej na podstawie obiektywnych kryteriów. Problem wiarygodnej oceny stanu łopatek turbiny gazowej wydaje się być zatem w pełni uzasadniony. Opracowanie nieniszczącej metody diagnostycznej tego elementu maszyny przyczyni się do poprawienia niezawodności działania turbin gazowych. W celu zobiektywizowania oceny stanu łopatek w artykule zaproponowaną metodę skanowania pozyskanych obrazów ich powierzchni pod kątem określenia wielkości obszaru przegrzanego [2-6].

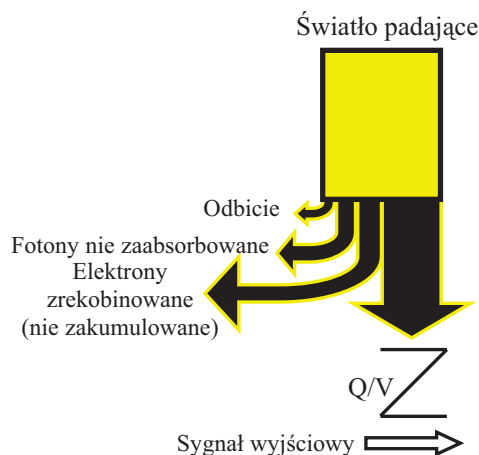
Współczesne metody przetwarzania i analizy obrazów znalazły szerokie zastosowanie w szeroko pojętej diagnostyce technicznej [6-9]. Obraz w naszym przypadku opisuje stan danej powierzchni (stopień przegrzania). Informacja o stanie powierzchni zapisywana jest w postaci obrazów cyfrowych i postrzegana jest jako zmiana luminacji (jasności) i chrominancji (barwy) docierającej do urządzenia rejestrującego - układu optycznego wraz z detektorem światłoczułym (matrycą CCD). Dane w postaci obrazów cyfrowych skorelowano z wynikami badań metalograficznych.

## 2. AKWIZYCJA OBRAZÓW ZA POMOCĄ MATRYCY CCD

Powierzchnia łopatki rozpoznawana jest przez detektor światłoczuły (matrycę CCD wraz z układem optyczny) dzięki światłu odbitemu - reemitowanego z jej powierzchni (wtórne źródło światła). Dzięki czemu możliwa jest pośrednia metoda rozpoznania badanego obiektu poprzez przetwarzanie i analizę danych pozyskiwanych w postaci obrazów cyfrowych. Strumień świetlny padający na powierzchnię metalową jest w bardzo małej części pochłonięty. Większość (90-95%) światła jest ponownie emitowana z powierzchni w postaci światła widzialnego o takiej samej długości fali jak światło padające. Pozostałe 5-10% energii rozproszone jest w postaci ciepła (zgodnie z zasadą zachowania energii). Budowa chemiczna materii pokrywającej powierzchnię obiektów metalowych decyduje o wygaszaniu poszczególnych długości fal w widmie promieniowania oświetlającego dany obiekt, a mieszanina światła selektywnie odbitego od danej powierzchni decyduje

o jej zabarwieniu (niektóre metale mogą mieć barwę wskutek selektywnego odbicia światła – złoto, miedź). W celu scharakteryzowania właściwości spektralnej badanej powierzchni można posłużyć się wykresem zależności widmowego współczynnika luminancji w funkcji długości fali (krzywa zdolności odbijającej).

Matryca CCD jest światłoczułym detektorem (fotodetekтором). W pewnym uproszczeniu, można powiedzieć, że zbudowana jest z pikseli z których każdy jest częścią składową rejestrowanego obrazu (pojedynczym punktem). Zadaniem pikseli (elementy przetwarzająco-akumulujące) jest wychwytywanie fotonów (pomiar natężeń światła) w tym celu wykorzystują efekt fotoelektryczny - uwalnianie elektronów pod wpływem energii fotonów docierających do ośrodka (schemat tego przekształcenia oraz powstające straty ilustruje rysunek 2). Następnie poprzez elektrody zgromadzone na końcu każdego rzędu pikseli, zgromadzony sygnał trafia do wzmacniacza. Ze wzrostem wzmocnienia rośnie również poziom szumów. Przejawia się to jako ziarnistość oraz zaburzenia barwy przetwarzanych obrazów.



Rys. 1. Schemat blokowy strat w procesie przekształcania sygnału optycznego na elektryczny CCD [10]

Matryca CCD sama w sobie nie rozróżnia barw, lecz jedynie zlicza padające fotony (promienie świetlne padające na poszczególne piksele). Przed samym sensorem umieszczony jest filtr barwny składający się z trzech podstawowych kolorów: czerwony, zielony i niebieski (taki schemat kolorów podstawowych nazywany jest RGB, od pierwszych liter angielskich nazw Red, Green, Blue). To jest najczęściej stosowanym układem kolorów w filtrze, nazywany schematem (filtrem) Bayera.

Problem akwizycji obrazów za pomocą matrycy CCD i jakości odwzorowania ujęcia mają wpływ następujące czynniki i parametry:

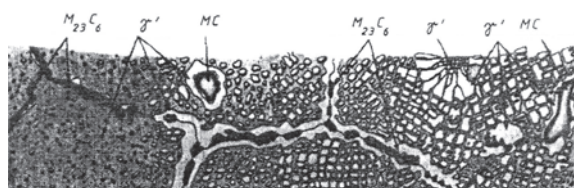
- zbyt niska czułość matrycy CCD - duże zaszumienie (ziarnistość);
- zniekształcenie - mniej uciążliwy błąd głównie wynikający z konstrukcji obiektywu - wśród tego

znieskształcenia wymiarów obrazu rodzaju przekłamań należy wymienić:

- winietowanie - lekkie przyciemnienie brzegów obrazów;
- aberracje chromatyczne - delikatne rozjeżdżanie się kolorów na cienkich liniach - kreski przypominają wtedy miniaturowe tęcze;
- poziom szumów (widoczny na zdjęciach jako nieregularne jasne i ciemne plamki pojawiające się podczas fotografowania powierzchni o jednolitych barwach);
- dokładność odwzorowania kolorów i jasności - czyli umiejętność odczytania przez matrycę głębokiej czerwieni, czerni, czy też fragmentów o bardzo dużej jasności.

### 3. WPLYW WYSOKIEJ TEMPERATURY NA DEGRADACJĘ MATERIAŁU ŁOPATEK TURBIN GAZOWYCH W PROCESIE ICH EKSPLOATACJI

W procesie eksploatacji turbin gazowych występują różnego rodzaju uszkodzenia ich elementów, a zwłaszcza łopatek. Najczęstszą przyczyną uszkodzeń są niekorzystne zmiany struktury materiału łopatek spowodowane nadmierną temperaturą i czasem jej oddziaływania oraz agresywnością spalin [5, 9, 11]. Drugim rodzajem uszkodzeń to zmęczenie cieplne łopatek aparatu dyszowego, jak i wirnika. Jako materiały żaroodporne i żarowytrzymałe (przykładowy schemat struktury stopu żarowytrzymałego przedstawiono na rys. 2) stosuje się stopy żelaza z niklem, niklu oraz kobaltu, (zwane nadstopami) pracujące w temperaturze do 1300 C (łopatki turbin gazowych) [1, 2].



Rys. 2. Przykładowa mikrostruktura stopu żarowytrzymałego [12]

Są to materiały do obróbki plastycznej, jak i odlewnicze. Materiały pracujące w takiej temperaturze spalin, muszą zachować wysoką wytrzymałość, odporność na korozję, pękanie, zmianę mikrostruktury (przegrzanie), jak również zmęczenie cieplne. W celu zwiększenia żaroodporności wyrobów wykonanych z nadstopów powierzchnie łopatek turbiny pokrywa się m. in. warstwą aluminium, związaną dyfuzyjnie z podłożem.

Proces destrukcji łopatki turbiny gazowej rozpoczyna się od niszczenia warstwy aluminiowej. W efekcie tego materiał łopatki narażony jest na

bezpośrednie agresywne oddziaływanie spalin. Taka sytuacja powoduje możliwość przegrzania materiału łopatki, objawiającego się niekorzystnymi zmianami mikrostruktury. Czynnikiem mającymi wpływ na to zjawisko są temperatura nadkrytyczna, czas jej oddziaływania oraz chemiczna agresja spalin.

Generalnie, zmiana mikrostruktury polega na rozroście fazy międzymetalicznej  $Ni_3(Al, Ti)$  nazywaną fazą  $\gamma'$ . Faza ta wywiera decydujący wpływ na własności stopów żaroodpornych i żarowytrzymałych. W szczególnych przypadkach rozrost fazy  $\gamma'$  prowadzi do koagulacji wydzielen, a następnie rozpuszczenia ich w roztworze stałym. Wskutek tego drastycznie maleje żaroodporność i żarowytrzymałość stopu.

### 4. BADANIA DIAGNOSTYCZNE ŁOPATEK TURBINY GAZOWEJ

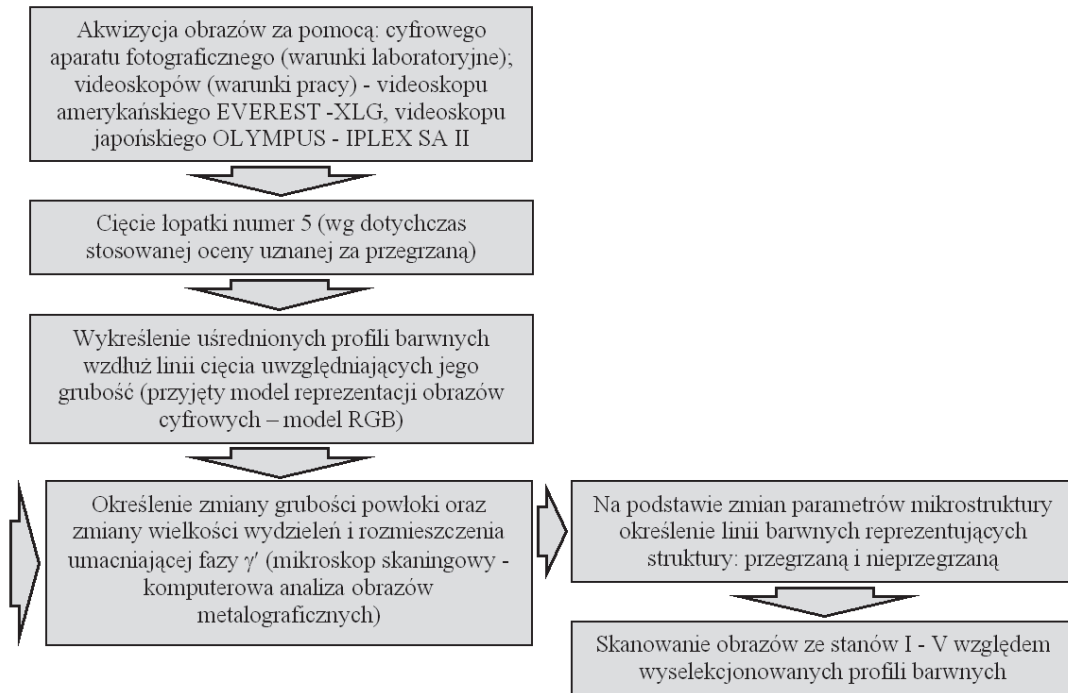
Badaniom diagnostycznym poddano piętnaście łopatek wieńca kierowniczego turbiny gazowej. Wstępną klasyfikację przyjęto wg dotychczas stosowanej oceny. Akwizycji obrazów powierzchni dokonano za pomocą cyfrowego aparatu fotograficznego (rys. 3) oraz dwóch typów videoskopów (amerykańskiego EVEREST -XLG oraz japońskiego OLYMPUS - IPLEX SA II).

W sumie wykonano po pięć zdjęć na każdy stan zapewniając dla każdego urządzenia powtarzalne warunki rejestracji (obrazy o tej samej rozdzielczości, światło rejestrowane w zakresie widzialnym, kąt detekcji obrazu 90°, wybór obszaru ROI wzdłuż krawędzi natarcia, głębia kolorów - 24 bitowa). Metodę badań eksploatowanych łopatek turbiny gazowej pokazano na rys. 4.

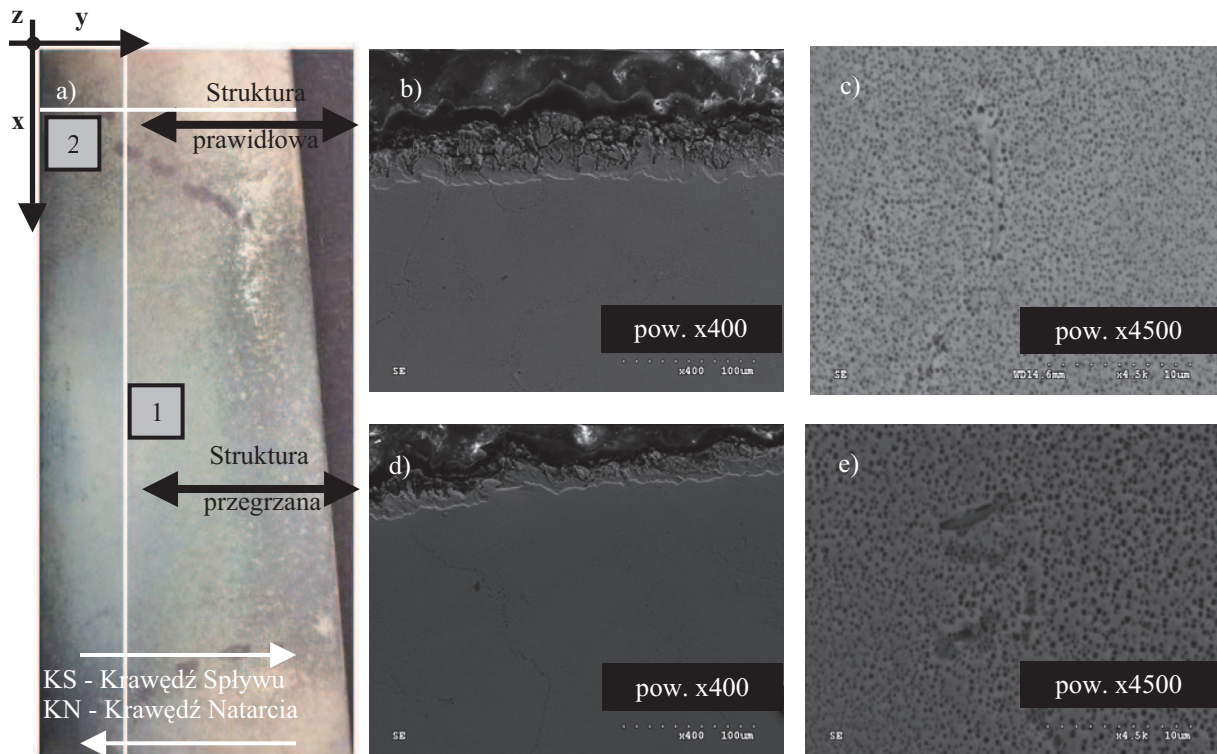


Rys. 3. Przyjęta klasyfikacja stopnia przegrzania łopatek (wg dotychczas stosowanej oceny) – pozyskanie obrazów za pomocą aparatu cyfrowego

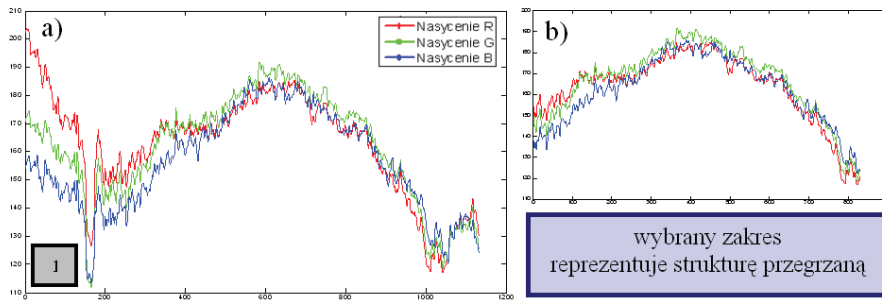
Piąty stan wg dotychczas stosowanej klasyfikacji określa łopatkę przegrzaną. W celu weryfikacji tej oceny przeprowadzono badania metalograficzne wzdłuż dwóch linii cięcia (rys. 5 a, b, c, d, e).



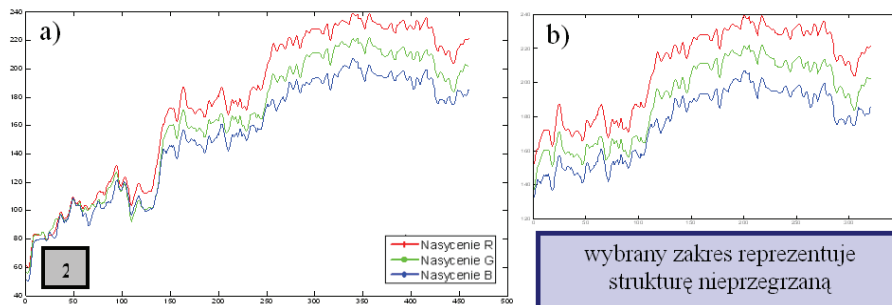
Rys. 4. Etapy realizacji diagnostycznej metody badań eksploataowanych łopatek turbiny gazowej



Rys. 5. Wyniki badań metalograficznych łopatki wieńca kierowniczego wykonanej ze stopu ŻS6 K: a) linie (1,2) cięcia łopatki; b,c) przykład struktury nieprzegrzanej warstwy powierzchniowej i warstwy podpowierzchniowej; d,e) przykład struktury przegrzanej warstwy powierzchniowej i warstwy podpowierzchniowej



Rys. 6. Usrednione profile barwne RGB (aparatus cyfrowy): a) wzdluz linii nr 1 – rownoleglej do KN; b) wybrany zakres reprezentujacy strukture przegrzana



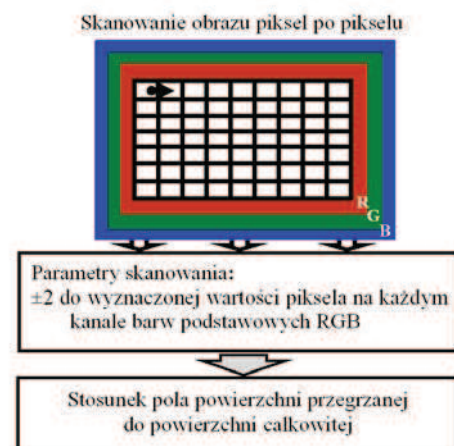
Rys. 7. Usrednione profile barwne RGB (aparatus cyfrowy): a) wzdluz linii nr 2 – prostopadlej do KN; b) wybrany zakres reprezentujacy strukture nieprzegrzana

Określono zmiany grubości powłoki (na osnowie Al) i zmiany wielkości wydzielen i rozmieszczenia umacniającej fazy  $\gamma'$  (mikroskop skaningowy, komputerowa analiza obrazów metalograficznych). Zmiany tych dwóch parametrów mają decydujący wpływ na żarowytrzymałość i żaroodporność badanego stopu [3, 4, 5, 12]. Dzięki czemu możliwe było (dla każdego urządzenia rejestrującego) wykreślenie usrednionego (uwzględniającego grubość cięcia) profilu barwnego reprezentującego strukturę przegrzaną (wybrany zakres wzdłuż linii 1 – rys. 6 a,b) i strukturę nieprzegrzaną (wybrany zakres wzdłuż linii 2 – rys. 7 a, b) uzależnionego od zmian mikrostruktury.

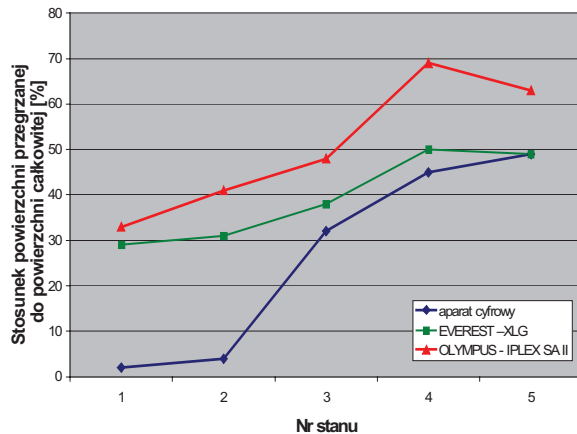
Na podstawie dwóch zakresów profili barwy (rys. 6b, rys. 7b) każdy element (piksel po pikselu) powierzchni ze stanów (I-V) łopatki turbiny badany był pod kątem występowania punktów barwnych (RGB) określających strukturę przegrzaną i nieprzegrzaną (z tolerancją  $\pm 2$  dla każdego punktu z wybranego zakresu) - rys. 8.

Gdy spełniony był warunek, że piksel znajdował się w zakresie z rysunku 6b, to w macierzy wynikowej ustawiana była cyfra 1. Przy czym należy nadmienić, że w przypadku zakresu struktury nieprzegrzanej jedynka była ustawiana dla pikseli nie leżących w zakresie z rysunku 7b. Otrzymanie wyniku końcowego, dla każdego ze stanów, polegało na sumie logicznej dwóch macierzy. Obie macierze reprezentowały punkty uznane za przegrzane przy czym wartości drugiej macierzy, jak to zostało opisane powyżej, otrzymane zostały poprzez negację punktów

barwnych reprezentujących strukturę nieprzegrzaną (punkty przegrzane). Dla każdego ze stanów zsumowano punkty (piksele obrazu) uznane za przegrzane i odniesiono je do całkowitej ich ilości. W rezultacie otrzymano stosunek pola powierzchni przegrzanej do powierzchni całkowitej wybranych obszarów ROI (rys. 9).



Rys. 8. Schemat skanowania obrazów powierzchni łopatek eksploataowanych



Rys. 9. Wynik skanowania obrazów powierzchni

## 5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

W wyniku skanowania obrazów powierzchni łopatek dla stanów I-V otrzymano stosunek powierzchni przegrzanej do powierzchni całkowitej (wyrażony w procentach). Powyższy wykres wskazuje, że łopatkę ze stanu trzeciego należy uznać za przegrzaną. Powyższe postępowanie może przyczynić się do zwiększenia wiarygodności (zobiektywowania) oceny stanu łopatki. Zautomatyzowanie akwizycji obrazu wraz z programem do rozpoznawania stanu powierzchni łopatki przyczyni się do bardziej wiarygodnej niż dotychczas oceny jej stanu. Procentowe różnice poszczególnych stanów wynikają ze sposobu oświetlenia rejestrowanego obiektu tzn. w warunkach laboratoryjnych mamy do czynienia ze światłem rozproszonym, a w przypadku videoskopów ze światłem skupionym. Inna jest także zdolność rejestracji i postrzegania barw przez zastosowane w urządzeniach detekcyjnych różne światłoczułe matryce CCD. Warto jednak zauważyć, że użycie urządzeń wzornikowych (videoskopy) do akwizycji obrazów może posłużyć do śledzenia zmian w czasie (monitoringu) stanu łopatek (rozwoju uszkodzeń - stanu technicznego badanych elementów) w badaniach okresowych bez potrzeby rozmontowania turbiny gazowej.

## LITERATURA

- [1] Wiatrek R. i inni: *Zespoły wirnikowe silników turbinowych*. Seria wydawnicza „Napędy Lotnicze”, WKŁ, Warszawa, 1982.
- [2] Błachnio J.: *Non-destructive testing methods as applied to the diagnosing of turbine engines*. IV International Scientific – Technical Conference, Gdańsk – Kopenhaga, 2005.
- [3] Dudziński A.: *Analiza rentgenostrukturalna stopu EI-929 poddanego długotrwałemu wygrzewaniu*. Rozprawa doktorska. WAT, Warszawa, 1987.
- [4] Poznańska A.: *Żywotność łopatek silników lotniczych ze stopu EI-867 w aspekcie odkształcenia niejednorodnego i zmian strukturalnych*. Rozprawa doktorska. Politechnika Rzeszowska, Rzeszów, 2000.
- [5] Bajar Z. i inni: *Zmiany mikrostruktury łopatek ze stopu ŁK-4 w warunkach długotrwałej eksploatacji turbiny silnika lotniczego*. Biuletyn WAT, nr.12 (1988), ss. 51-64.
- [6] Bogdan M., Błachnio J.: *Analiza sygnału świetlnego odbitego od powierzchni w diagnostyce obiektów technicznych*. VI Krajowa Konferencja : „Diagnostyka techniczna urządzeń i systemów DIAG'2006”. Ustroń, 2006; Diagnostyka Nr 2/38/2006, ss.175÷186.
- [7] Sanecki J.: *Teledetekcja - pozyskiwanie danych*. WNT, Warszawa, 2006.
- [8] Manabe Y., Inokuchi S.: *13<sup>th</sup> International Conference on Pattern Recognition (ICPR'96)*. Vol. 1, 1996, str. 840÷843.
- [9] Błachnio J.: Bogdan M.: *The assessment of the jet gas-turbine blade condition*. Archives of Transport. (w druku).
- [10] Rafałowski M.: *Scalone analizatory w pomiarach techniki świetlnej i oceny kształtu obiektów*. Rozprawy naukowe Nr 114. Wydawnictwo Politechniki Białostockiej. Białystok 2004.
- [11] Błachnio J.: *The effect of high temperature on the degradation of heat-resistant and high-temperature alloys*. MSM2008 (w przygotowaniu).
- [12] Chodorowski J. i inni: *Materiałoznawstwo lotnicze*. Politechnika Warszawska, Warszawa 2003.



Dr hab. inż. **Józef BŁACHNIO** profesor nadzw. na Wydziale Mechanicznym Politechniki Białostockiej. Reprezentowane dziedziny, dyscypliny i specjalności: nauki techniczne, budowa eksploatacja i diagnostyka maszyn: samoloty i śmigłowce, silniki lotnicze, inżynieria materiałowa, inżynieria powierzchni.



Mgr inż. **Mariusz BOGDAN** słuchacz 2 roku studiów doktoranckich na Wydziale Mechanicznym Politechniki Białostockiej. Zainteresowania naukowe: analiza i przetwarzanie obrazów, diagnostyka techniczna. Otwarty przewód doktorski z zakresu budowy i eksploatacji maszyn.