Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym
Modern material technologies in aerospace industry

INNOWACYJNA GOSPODARKA
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI FUNDUSZ
ROZWOJU REGIONALNEGO

KONFERENCJA
RADY PARTNERÓW CZT AERONET
KONFERENCJA ROCZNA PKAERO
9 - 10 Grudnia 2013

ZB 10

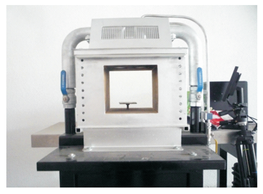
Badanie rozkładu parametrów powłok ochronnych dla gorących części silnika
Measurements of distribution of termal barier coating for hot engine parts

Uniwersytet Rzeszowski, Politechnika Śląską Politechnika Warszawska, Politechnika Rzeszowska, Politechnika Lubielska

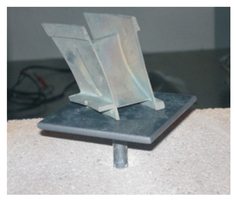
Wyniki badań
Results

Opis instalacji pomiarowej

Obliczenia pola naprężeń generowanych niejednorodnym polem temperatury pomierzonym bezpośrednio w czasie pracy silnika jest niezwykłe ważnym zadaniem tak z punktu spojrzenia prognozowania jego pracy, jak i z powodu bezpieczeństwa pracy. W bieżącym roku pomiary termograficzne zostały wykonane dla łopatek gazowych silnika odrzutowego podgrzanych dynamicznie w stanowisku grzewczym (Rys.1.) zmodyfikowanym o dodanie sterowanego stolika obrotowego umieszczonego w komorze spalania (Rys. 2.).



Rys. 1. Wysokotemperaturowe stanowisko grzewcze.
Fig.1. Combustion chamber



Rys. 2. Stolik w komorze grzewczej,
Fig. 2. Rotated table in the combustion chamber

Zastosowanie sterowanego stolika wyposażonego w mechanizm obrotowy, umożliwia obserwację wszystkich powierzchni badanego elementu w czasie rzeczywistym (kąt obrotu od 0 do 360°).

Przygotowanie kamery do pomiarów temperatury.

`W celu przeprowadzenia prawidłowych pomiarów rozkładu pola temperaturowego na powierzchni badanych łopatek został przeprowadzony szereg pomiarów służących do weryfikacji nastaw parametrów kamery (emisyjność badanego obiektu, temperatura pozorna, przepuszczalność atmosfery) aby poprawnie wyznaczyć wartości temperatury na podstawie zarejestrowanego promieniowania.

Do wykonania pomiarów kalibracyjnych zostały wykorzystane:
a) czujnik głowicowy z osłoną ceramiczną DTR TTKC - 22 wyposażony w termoparę typu K pracujący w zakresie temperatur - 40 - 1200°C w połączeniu z multimetrem METEX
b) Pirometr Sonel DIT 500 z optyką 50:1, pracujący w zakresie temperatur - 5 - 1600°Cwyposażony w sondę typu K pracującą w zakresie - 50 - 1370°C.

Pomiar rozkładu pola temperaturowego wykonany został przy użyciu kamery termowizyjnej FLIR SC7000 z zamontowanym obiektywem 50mm ustawionej w odległości 1,35m od badanego obiektu. Zakres temperaturowy kamery został ustawiony na 200 - 1500°C. Pomiar wykonywany był z częstotliwością 25Hz dla czterech czasów integracji matrycy CCD (Rys. 3).

Rys. 3. Wysokorozdzielcza kamera termograficzna FLIR Sc7000.
Fig. 3. The high resolution thermographic camera FLIR Sc7000

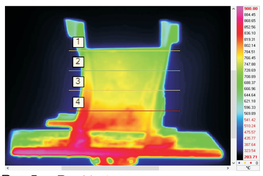
Rys. 4. Łopatka kierownicza bez i z pokryciem TBC
Fig. 4. Blade directional without TBC

Po przeprowadzeniu pomiarów termograficznych dla dwóch rodzajów łopatek gazowych (bez bariery TBC oraz z barierą TBC) otrzymano termogramy obrazujące rzeczywisty rozkład pola temperaturowego na ich powierzchni.
Obiektami badań są łopatki kierownicze bez pokrycia ochronnego i z pokryciem (Thermal Barrier Coating – TBC). Wykonane ze stopu ZS6KWI.

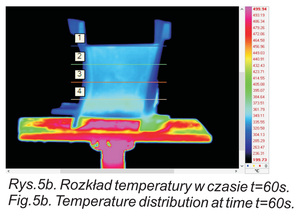
Realne rozkłady temperatur dla łopatek z i bez TBC.

Rysunki 5 a, b, przedstawiają termogramy z naniesionymi profilami liniowymi dla łopatki bez bariery TBC w dwóch momentach czasowych w chwili rozpoczęcia i zakończenia pomiaru. Czas wzbudzenia termicznego łopatki wynosił 180s, natomiast czas ochłodzenia 60s, czyli maksymalnie jest on przybliżony do warunków realnych. Łopatki chłodzone były strumieniem powietrza o temperaturze 20° C z prędkością 20m/s.

Łopatka bez pokrycia TBC

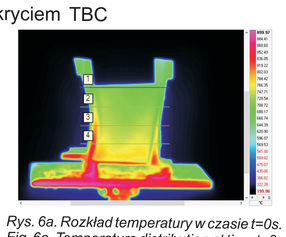


Rys.5a. Rozkład temperatury w czasie t=0s.
Fig.5a. Temperature distribution at time t=0s.

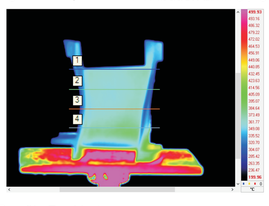


Rys.5b. Rozkład temperatury w czasie t=60s.
Fig.5b. Temperature distribution at time t=60s.

Łopatki z pokryciem TBC



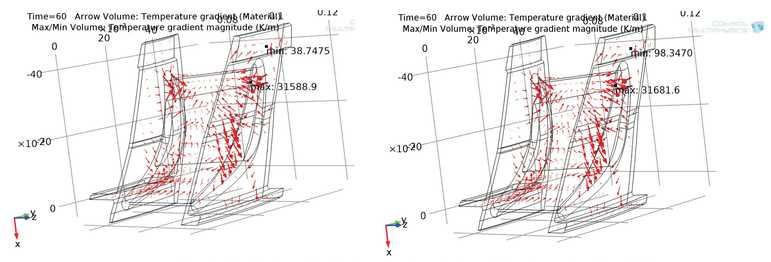
Rys. 6a. Rozkład temperatury w czasie t=0s.
Fig. 6a. Temperature distribution at time t=0s.



Rys.6b. Rozkład temperatury w czasie t=60s.
Fig.6b. Temperature distribution at time t=60s.

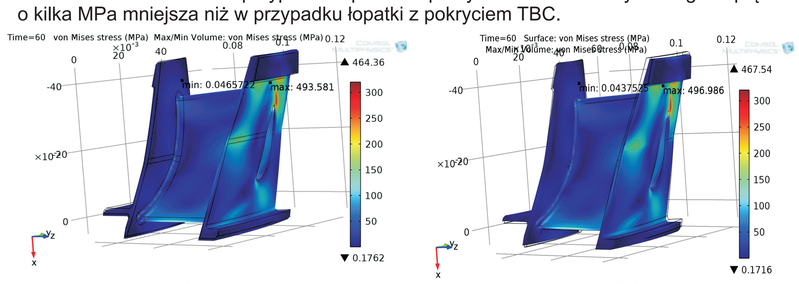
COMSOL – komputerowy program dla obliczenia termonaprężeń.

Obliczone zostały gradienty temperatury materiału dla obu rodzajów łopatek.



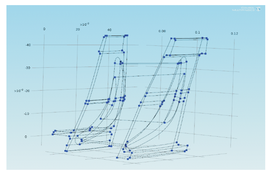
Rys.7. Rozklad gradientów temperatury dla łopatki bez i z pokryciem TBC
Fig. 7. Temperature gradients for blades with and without TBC

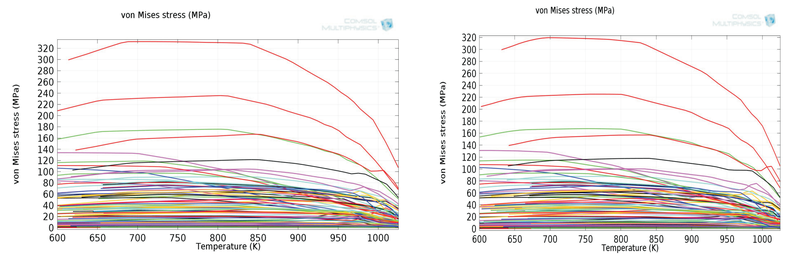
Po 60 sek. ochładzania w przypadku łopaki bez pokrycia wartość maksymalnego naprężenia jest o kilka MPa mniejsza niż w przypadku łopatki z pokryciem TBC.



Rys.8. Rozkłady termonaprężeń dla łopatek bez pokrycia i z pokryciem TBC
Fig. 8. Distributions of thermostresses for blades with and without TBC

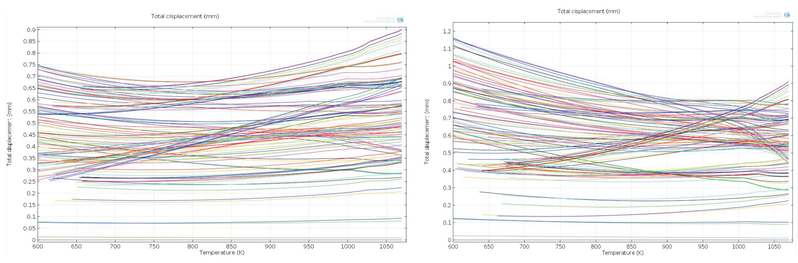
Obliczone zostały termonaprężenia dla dwóch rodzajów łopatek. Podczas pomiaru łopatki zostały podgrzewane przez 3 minuty i osiągnęły maksymalną temperaturę 850 stopni, następnie rozpoczęto 60 sekundowy proces ochładzania. Każdy punkt na przestrzeni łopatki odpowiada kolejno liniom na wykresie. Jak widzimy proces ochładzania powoduje wzrost termonaprężeń w obu przypadkach.





Rys. 9. Temperaturowa zależność termonaprężeń dla łopatki bez i z pokryciem
Fig. 9. Temperature dependences on thermostresses for blades without and with TBC

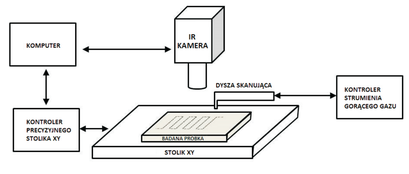
Na Rys.10. zostały przedstawione przesunięcia całkowite wybranych punktów odpowiednio dla łopatki bez pokrycia oraz łopatki z pokryciem ochronnym. Zauważono znaczne różnice przesunięć wybranych odpowiednio punktów w funkcji temperatury.



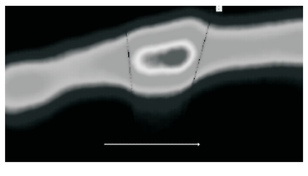
Rys. 10. Całkowite przesunięcia Δl(x,y,T) wybranych punktów w funkcji temperatury dla łopatek bez pokrycia i z pokryciem
Fig.10. Total displacements Δl(x,y,T) as a funcions of temperature for selected points for blades without and with cover

Opracowanie termograficznej metody rejestracji defektów w powłokach ochronnych. Stworzenie odpowiedniej instalacji pomiarowej. Wykonanie pomiarów termograficznych w celu rejestracji defektów w powłokach ochronnych.

Sposób bezdotykowej kontroli jednorodności ochronnych powłok powierzchniowych, wykorzystujący pomiar natężenia promieniowania elektromagnetycznego wzbudzonego w badanej warstwie wskutek wprowadzenia strumienia energii o kontrolowanych parametrach od zewnątrz.



Rys. 13. Schemat systemu do kontroli jednorodności powłok: schemat blokowy,
Fig.13. Diagram of the system to control the uniformity of coatings: block diagram



Rys. 14. Miejsce zawierające ukryty defekt w postaci klina lawsanowego, zarejestrowane na badanej powierzchni przez skanującą dyszę.
Fig.14.Place containing a hidden defect in the form of a "lawsan" wedge, recorded on the test surface by scanning the nozzle.

Przykłady współpracy z przemysłem lotniczym
Collaboration with aviation industry

Przedstawiony cykl badań został wykonany na rzeczywistych łopatkach kierowniczych silnika odrzutowego PZL-W10 śmigłowca Sokół budowanego na WSK "PZL Rzeszów". Dane materiału łopatki: stop ŻSKWI. Dane materiału powłoki ochronnej: ZrO. Otrzymane wyniki rozkładu termonaprężeń na bazie rzeczywistych pomierzonych rozkładów temperatury w czasie nagrzewania oraz szybkiego ochłodzenia pozwalają na modyfikację formy łopatki w celu zmniejszenia wielkości maksymalnych naprężeń, a szczególnie przesunięć punktów łopatki. Rekomendacje, powstałe w wyniku prowadzonych wspólnych badań będą mogły być bezpośrednio wdrożone, najpierw przez prototypy łopatek a później w produkcję.

Wnioski
Conclusions

- Termo naprężenia zostały obliczone na podstawie doświadczalnych pomiarów rozkładów temperatury z użyciem termograficznej wysoko rozdzielczej kamery FLIR SC7000;
- Pomiary zostały wykonane dla łopatek z powłoką ochronna TBC oraz bez TBC nagrzanych w specjalnej komorze symulującą komorę spalania silnika odrzutowego; rozkłady temperatury zostały pomierzone tak w momencie nagrzania do maksymalnej temperatury jak i w czasie szybkiego ochłodzenia;
- Ten fakt oraz staranna kalibracja kamery termograficznej pozwoliły otrzymać realne rozkłady temperatury dla powierzchni łopatki w warunkach maksymalnie przybliżonych do realnej pracy silnika dla której charakterystycznym są częste procesy naprzemiennego ogrzewania i ochładzania;
- Obliczenia numeryczne powstających termo naprężeń zostały wykonane z użyciem programowania COMSOL na bazie doświadczalnych danych co umożliwiło nam ustalenie różnic w odkształceniach łopatek z TBC i bez TBC: maksymalne termo naprężenia w pierwszym przypadku są mniejsze;
- Wielkości całkowitych przesunięć l(x,y) różnych punktów (o różnych współrzędnych x,y) na łopatce bez i z TBC kształtują się w tym samym przedziale, a mianowicie: 0.01 – 1.1 mm, jednak charakter temperaturowych zależności Δl(x,y,T) dla tych samych punktów są różne: **w przypadku łopatek bez TBC** w momencie maksymalnego nagrzania $\Delta l(T_{max})$ mają większe wartości (od 0.02 do 0.90 mm) i wraz ze spadkiem temperatury dla większości punktów zmniejszają się – są w przedziale od 0.02 do 0.75 mm; natomiast **w przypadku łopatek z TBC** charakterystyczną jest dla większości punktów odwrotna tendencja– wzrost wartości Δl wraz z ochłodzeniem od wartości $\Delta l(T_{max})$ kształtujących się w przedziale 0.01 – 0.70 mm do wartości kształtujących się w przedziale 0.1 – 1.20 mm, chociaż dla niektórych punktów są też tendencje spadkowe.

Różny charakter temperaturowych zależności Δl(x,y,T) spowodowany jest większą niejednorodnością rozkładu temperatury w przypadku **łopatek bez TBC** przy maksymalnym nagrzaniu (większe gradienty temperatury), natomiast w czasie ochłodzenia większe gradienty temperatury powstają w **łopatce z TBC –** stąd i większe przesunięcia całkowite.

Conclusions

The thermal stresses are calculated on base of experimental measurements of the temperature distributions using the thermographic high resolution camera FLIR SC7000.
- The measurements were performed for blades with thermal barriers coatings (TBC) and for blades without TBC heated in special camera imitated the combustion chamber of the jet engine.
- That one and careful calibration of thermographic camera enable us to obtain the real distribution of temperature for different surfaces of blades at conditions approximated in maximal way to real conditions of the jet engine work for that characteristic are frequent thermo cycles.
- Numerical calculations were carried out using Program COMSOL on base of above mentioned experimental data what enable us to state differences in deformations of blades with TBC regarding to blades without TBC: the maximal thermostresses in case of second one are lager.
- The values of total displacements l(x,y) for different points (with different coordinates x,y) in case of both type of blades with TBC and without one taken place in interval of 0.01 – 1.1 mm, nevertheless, a character of temperature dependences Δl(x,y,T) for the same points of blades is different for different types of blades: in case of blades without TBC the values of total displacements at maximal heating $\Delta l(T_{max})$ are located in interval from 0.02mm to 0.90 mm e.g. have lager values and these values are decreased with decreasing of temperature, whereas, in case of blades with TBC is typical the opposite tendency – increasing of values of total displacements with decreasing of temperature from value $\Delta l(T_{max})$ located in interval 0.01 – 0.70 mm to values 0.1 – 1.20 mm (nevertheless, the opposite tendency exists for some points also).
- These different character of dependences Δl(x,y,T) is caused by a non-homogeneous distribution of temperature for blades without TBC at maximal heating (largest gradients), whereas, for the blades with TBC the largest gradients arouses at cooling what causes largest thermal stresses and total displacements.

Przykłady zastosowania w lotnictwie
Examples of application in aviation

Otrzymane wyniki rozkładu termonaprężeń obliczone na bazie rzeczywistych pomierzonych rozkładów temperatury w czasie nagrzewania oraz szybkiego ochłodzenia pozwalają na modyfikacje formy łopatki w celu zmniejszenia wielkości maksymalnych naprężeń, a szczególnie dotyczy to przesunięć punktów łopatki.

Rekomendacje, powstałe w wyniku prowadzonych wspólnych badań będą mogły być bezpośrednio wdrożone najpierw przez prototypy łopatek, a później w produkcję.

Następny cykl badań będzie dotyczył rozkładu naprężeń różnego typu łopatek kierowniczych oraz łopatek wirujących w celu minimalizacji naprężeń i przesunięć punktów poprzez zmianę tak formy łopatek jak i rodzaju pokryć ochronnych.

Wskaźniki realizacji celów projektu
Indicators of the project

Referat

K. Maś, M. Woźny, M. Marchewka, D. Płoch and E.M. Sheregii, Thermal Stresses for Turbine Blades calculated on base of measured Temperature Distributions, 8th International Conference "Supply on the Wings", Frankfurt/Main, Germany, November 5-7, 2013

Prace inżynierskie planowane:

1. Syty Piotr - Mikroskopia AFM jako instrument badania topologii nanostrukturowanych stopów metalicznych. Promotor: prof. dr hab.. Eugeniusz Szeregij
2. Pieczykolan Wioletta - Rozkład termonaprężeń określany na podstawie rozkładu temperatury w strukturach z barierami (pokrycia ochronne). Promotor: prof. dr hab. Eugeniusz Szeregij
3. Ciszek Maria - Rozkład tenmperatury w strukturach z barierami (pokrycia ochronne) określone metodą termografii. Promotor: prof. dr hab. Eugeniusz Szeregij

Zgłoszenia patentowe

K. Maś, M.. Woźny, S. Prochorenko, Kataryna Kashpor, Eugeniusz Szeregij, Sposób bezdotykowej kontroli jednorodności ochronnych powłok powierzchniowych, nr P. 403346

PROJEKT WSPÓŁFINANSOWANY PRZEZ UNIĘ EUROPEJSKĄ ZE ŚRODKÓW EUROPEJSKIEGO FUNDUSZU ROZWOJU REGIONALNEGO