

Zdzisław LISEWSKI
Instytut Lotnictwa w Warszawie

ANALIZA OBLICZENIOWA SKUTECZNOŚCI IZOLACJI CIEPLNEJ POWŁOKI CERAMICZNEJ UŻYTEJ NA ŁOPATCE TURBINY GAZOWEJ

Streszczenie. Na przykładzie łopatki badawczej kierownicy turbiny pokazano duże możliwości obniżenia temperatury ścianki metalu przy zastosowaniu powłoki ceramicznej oraz podkreślono wysoką efektywność chłodzenia. Analizę przeprowadzono korzystając z opracowania NASA TP [2].

COMPUTATIONAL ANALYSIS OF THERMAL ISOLATION EFFECTIVENESS OF THE CERAMIC COATING APPLIED ON A GAS TURBINE VANE

Summary. On the example of experimental gas turbine vane, great possibilities of wall temperatures decreasing, by application an isolating ceramic coating, were showed and a high effectiveness of cooling was underlined, as well. The conducted analysis was based on the paper of NASA TP [2].

РАСЧЕТНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ КЕРАМИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ ЛОПАТКИ ГАЗОВОЙ ТУРБИНЫ

Резюме. На примере лопатки экспериментального соплового аппарата турбины показаны большие возможности снижения температуры металла стенки при использовании керамического покрытия а также показана высокая эффективность охлаждения. В анализе использовано отчет NASA TP [2].

1. WPROWADZENIE

Chłodzone łopatki turbin znalazły prawie powszechne zastosowanie we współczesnych silnikach lotniczych. Wysokie temperatury gazów spalinowych przed turbiną, rzędu 1500 - 1700 K, umożliwiają optymalizację obiegu cieplnego przy wyższych sprężach i uzyskanie zwartej, o mniejszych wymiarach konstrukcji silnika, odznaczającej się obniżonym zużyciem paliwa. Wysokie temperatury gazów zasilających turbinę przekraczają poziom dopuszczalnej temperatury ze względu na wytrzymałość materiałów używanych na łopatki. Chłodzenie łopatek jest więc

niezbędne. Do chłodzenia wykorzystywane jest powietrze, brane z upustu sprężarki silnika. Upust powietrza wpływa niekorzystnie na osiągi silnika. Podstawowym zatem zadaniem prac badawczo - rozwojowych jest dążenie do doskonalenia technologii procesu chłodzenia, by przez poprawę efektywności metod chłodzenia zmniejszyć straty osiąarów silnika spowodowane upustem powietrza.

2. ANALIZA OBLICZENIOWA WYMIANY CIEPŁA W KIEROWNICY Z POWŁOKĄ CERAMICZNĄ

W łopatkach chłodzonych stosuje się zwykle kombinację różnych metod chłodzenia. W skład tej kombinacji wchodzi: konwekcja wymuszona, natryskiwanie powierzchni chłodzonej z towarzyszącym przepływem krzyżowym, konwekcja z przepływem wokół turbulizatorów oraz chłodzenie błonowe. Te metody chłodzenia są nieraz uzupełniane powłokami ceramicznymi o bardzo małej przewodności cieplnej i stanowiących bariery termiczne dla strumieni ciepła.

Wymienione metody chłodzenia zostały uwzględnione w jednej z prac NASA [2]. Program TACT1 z tej pracy dotyczy analizy stanu termicznego łopatek chłodzonych za pomocą wkładu perforowanego. Łopaska wzdłuż wysokości podzielona jest na plastry o określonej grubości. Plaster jest jednostką obliczeniową programu. Na rys. 1 przedstawiono model plastru łopatki z siatką przekrojów obliczeniowych. W każdym przekroju wyróżnia się 5 węzłów obliczeniowych, rozmieszczonych od strony gorących gazów w kierunku wnętrza łopatki. Przygotowanie danych do obliczeń jest pracochłonne, szczególnie w zakresie wielkości geometrycznych łopatki. W celu zautomatyzowania prac projektowych opracowano program generujący dane do obliczeń i kreślący łopatkę przedstawioną na rys. 1 [6].

Przytoczone niżej rozważania dotyczą chłodzonej łopatki kierownicy turbiny dla układu chłodzącego, dostosowanego do programu TACT1. Przedmiotem analizy jest łopaska pokryta powłoką ceramiczną i z chłodzeniem wewnętrznym za pomocą wkładu natryskowego. Łopaska jest przewidywana do badań stoiskowych w warunkach modelowych, tj. w temperaturze gazów spalinowych $T_c=600$ K.

Przystępując do obliczeń łopatki chłodzonej staje się zazwyczaj przed zadaniem określenia, na profilu jednego z podstawowych warunków brzegowych w wymianie ciepła, tj. rozkładu współczynnika przejmowania ciepła od przepływającego gazu do łopatki (alfa). Istnieją tu dwie drogi postępowania: obliczenia teoretyczne rozkładów współczynnika alfa i skorzystanie z wyników przeprowadzonych badań eksperymentalnych. Z analizy zebranych danych doświadczalnych, często kontrowersyjnych, przedstawiono na rys. 2 rozkłady współczynników alfa, które uznano za odpowiednie do wykorzystania w obliczeniach.

W celu wykazania intensywności oddziaływania tych zróżnicowanych rozkładów współczynnika przejmowania ciepła na zachodzące w łopatkę procesy cieplne wykonano obliczenia dla dwóch rozkładów alfa: A3 i A2. Rezultaty przeprowadzonych obliczeń przedstawiono na rys. 3 i 4. Aby bardziej wypuklić transformację alfy na temperaturę łopatki, natryskiwano z wkładu perforowanego tylko krawędź natarcia w przekrojach 1, 2, i 3 (rys. 1). Cała pozostała część łopatki była chłodzona konwekcyjnie. Wyjściowa ilość powietrza użytego do chłodzenia plastra o wysokości 9 mm dla wszystkich przypadków była stała i wynosiła 1.2 kg/h. Stanowi to około 0.5% ilości powietrza chłodzącego, pobieranego ze sprężarki.

Do pokrycia powierzchni zewnętrznej łopatki użyto powłoki ceramicznej z materiału o znanych właściwościach izolacyjnych, tj. yttrii stabilizowanej cyrkonią ($Y_2O_3 - ZrO_2$). Współczynnik przewodnictwa ciełnego tego materiału wynosi 0.008 - 0.01 W/m*K. Skuteczność izolacji termicznej przebadano dla trzech grubości powłok ceramicznych: 0.2, 0.3 i 0.4 mm.

Na rys. 3 przedstawiono w sposób zbiorczy wyniki zrealizowanych obliczeń cieplnych. Górne krzywe oznaczone symbolami "C" przedstawiają temperatury na powierzchni ceramiki od strony gorącego gazu. Rozkłady te przenoszą wiernie na temperaturę zmiany współczynnika alfa, z odróżnieniem powierzchni ssącej i ciśnieniowej profilu. W dolnej części rysunku, poniżej temperatury 400 K, przebiegają regularnie i z tendencją do wyrównania rozkłady temperatury metalu łopatki pokrytej ceramiką. Najniższą krzywą, przedstawiającą prawie całkowicie wyrównaną temperaturę łopatki, uzyskano przy zwiększonym do 2% wydatku powietrza chłodzącego. Poniżej najwyższych temperatur położona jest krzywa "M", stanowiąca rozkład temperatury bez ceramiki. Symbolem "NATR" oznaczono temperaturę łopatki bez ceramiki, ale przy pełnym wykorzystaniu możliwości chłodzących wkładu perforowanego i przy zwiększonym wydatku powietrza chłodzącego - łącznie 5%.

Rysunek 4 przedstawia rezultaty obliczeń dla współczynnika przejmowania ciepła "A2" (rys. 2), przyjmującego wartości niższe w porównaniu z "A3", użytym w obliczeniach i przedstawionych na rys. 3. Jakościowo rezultaty przedstawione na rys. 4 są podobne do wyników prezentowanych na rys. 3. Także i tu widoczna jest transformacja współczynnika alfa na temperaturę ceramiki i wyrównane rozkłady temperatury metalu łopatki. Należy też podkreślić malejącą skuteczność grubszych powłok. Na omawianym rysunku pokazano również zachowanie się temperatury metalu łopatki w przypadku pojawienia się ubytków masy ceramicznej. Obliczenia wykazują, że w miejscach uszkodzeń nie obserwuje się lokalnych, wysokich wzrostów temperatury, a jedynie pewne podniesienie jej poziomu.

Przytoczone przykłady potwierdzają przydatność warstwy ceramicznej jako izolatora części metalowej łopatki. Szersze upowszechnienie tej metody wymaga obniżenia

wysokich kosztów tej technologii, zwiększenia precyzji nakładania warstw i badań trwałościowych.

3. PODSUMOWANIE

Z przeprowadzonej analizy wynikają następujące wnioski:

1. Powłoka ceramiczna jest bardzo skutecznym i efektywnym materiałem chroniącym metalową łopatkę przed działaniem gorących gazów (obniżenie temperatury względem temperatury ceramiki wynosi 200 - 250 stopni).

2. Zróżnicowany rozkład temperatury na powłoce ceramicznej (wynik transformacji współczynnika przejmowania ciepła "A3 i A2") jest już na powierzchni metalu łopatki w przybliżeniu wyrównany (bardzo cenne zjawisko).

3. Uszkodzenia (ubytki) powłoki ceramicznej, które mogą powstać w czasie eksploatacji, nie doprowadzają w miejscach odstępionych do wzrostów temperatury, a w zasadzie do podniesienia średniego poziomu temperatury metalu łopatki.

LITERATURA

- [1] T. Arts, M. Lambert de Rouvroit: Aero - Thermal Performance of a Two - Dim. Highly Loaded Transonic Turbine Nozzle Guide; Vane: A Test Case for Inviscid and Viscous Flow Computations, Trans. of the ASME, J. of Turbomachinery, vol. 114 no. 1, 1992
- [2] Raymond E. Gaugler: TACT1 A Computer Program for the Transient Thermal Analysis of a Cooled Turbine Blade or Vane Equipped with a Coolant Insert, NASA TP 1271, 1978 oraz NASA TP 1391, 1979
- [3] D. J. Gaunter, James Sucec: Method for Calculating Convective Heat Transfer Coefficients over Turbine Vane Surfaces, NASA TP 1134, 1978
- [4] P. Krysztofik: Program obliczający lokalne współczynniki przejmowania ciepła od gazu na profilu łopatki turbiny; opracowanie wewn. IL, 1992 r.
- [5] Z. Lisewski: Analiza kierunków prac i metod wymiany ciepła w łopatkce chłodzonej turbiny osiowej, opracowanie wewn. IL, 1992 r.
- [6] L. Rzeszutek: Program "GENTACT" do generacji geometrii łopatki chłodzonej; opracowanie wewn. IL, 1992 r.

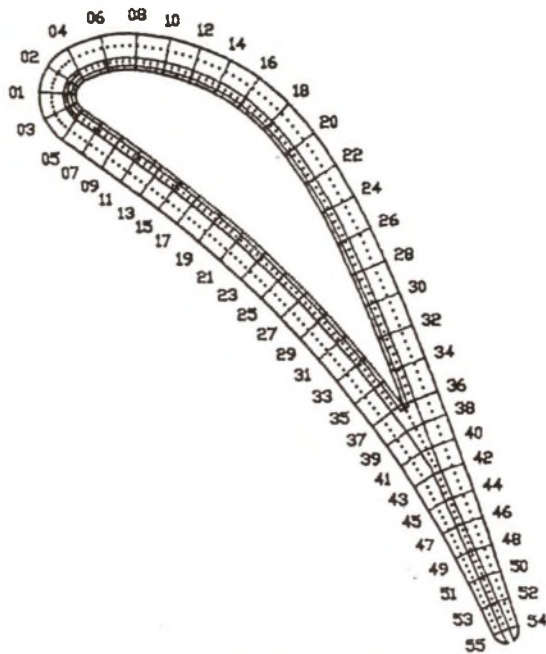
Recenzent: Dr. hab. inż. Jerzy Świder

Wpłynęło do Redakcji w grudniu 1993r.

Abstract

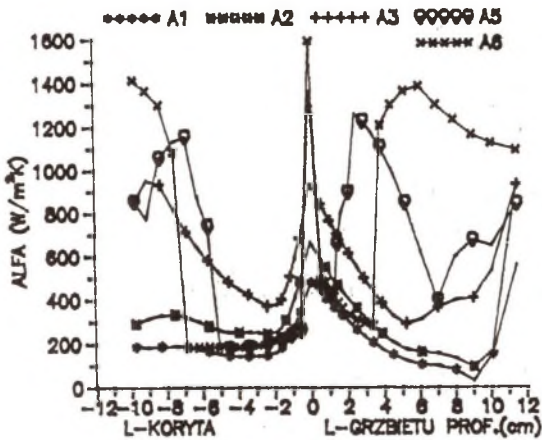
Gas turbines with cooled vanes and blades are at present almost generally applied in contemporary aircraft engines. The coolant air is taken from the compressor of the engine. The drop of the air influences unprofitably on the performance of the engine. Therefore more efficient cooling schemes are required to reduce the loss of performance. In cooling schemes, there are usually used combined methods, such as: forced convection, impingement cooling with cross - flow, forced convection around the pin - fin and film cooling. These methods are completed with ceramic coatings, which are thermal - barrier for the hot gas flux. For the purpose of analysing the effectiveness of ceramic coatings, was used the programme code from the paper - NASA TP [2]. Fig.1 refers to the cooling scheme, mentioned in [2], and shows a test vane. Its destination are modelling steady - state heat - transfer tests in a four - vane cascade facility. Therefore the calculations, presented in this paper, are done at the temperature 600 K. The results of the computational analyses are gathered in fig. 3 and 4. The results presented in fig. 3, are based on the heat - transfer coefficient distribution, marked with - "A3" and the results in fig. 4 - on the curve "A2", respectively (see fig. 2). The analysis was done by the assumption, that the flow rate of coolant air is nearly 10 times less than usually used.

The results obtained from this analytical investigation are as follows: 1.) the ceramic coating is a very effective material preventing the metal wall from hot - gas action, and the cooling has a great effectiveness (temperature drop: 200 - 250 degree), 2.) the differential distributions of temperature (the effect of heat - transfer coefficient distributions) on the ceramic coating, are on the metal wall - lower and at a nearly equal level for the suction and pressure surfaces, 3.) as can be seen in fig. 4, the losses of the ceramic coating don't cause the local temperature growth of the metal, but arise only the mean level of temperature.



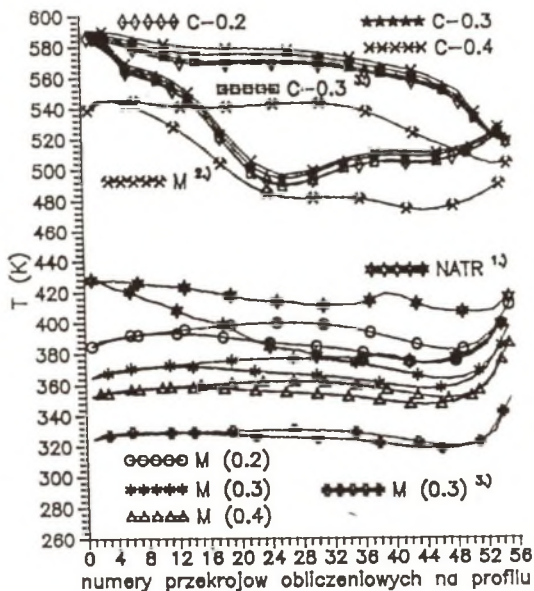
Rys. 1. Przekrój poprzeczny badawczej łopatki kierownicy turbiny z wewnętrznym układem chłodzenia (wkład perforowany). Wzdłuż obwodu profilu rozmieszczono 55 przekrojów a w każdym z nich, 5 węzłów obliczeniowych

Fig. 1. Cross-sectional midspan view of test vane with the internal cooling configuration (impingement insert). Along the profile, there are 55 stations with 5 computational nodes across the wall of the vane



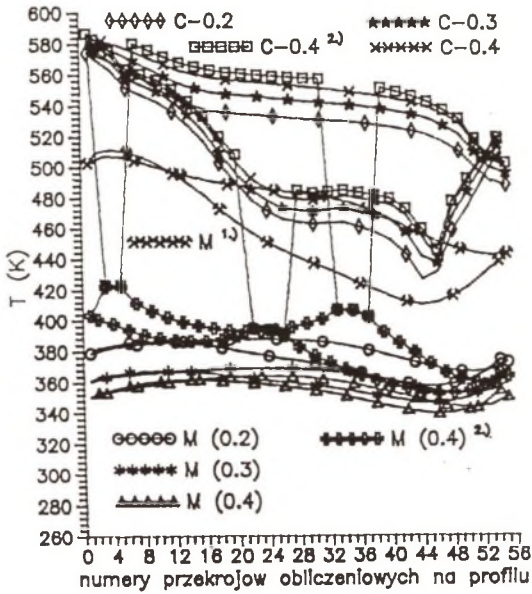
Rys. 2. Porównanie rozkładów współczynnika przejmowania ciepła na profilu kierownicy turbiny. Wyniki badań eksperymentalnych i teoretycznych. Legenda: A1, A2, A3 [1] - A1: $Ma=1.1$, $Re=5 \cdot 10^5$; A2: $Ma=1.07$, $Re=10^6$; A3: $Ma=1.09$, $Re=2 \cdot 10^6$; A5, A6 [4] - rozkłady teoretyczne: $Ma=1.1$, $Ma=1.3$

Fig. 2. Comparison of heat - transfer coefficient distributions around the profiles of a vane. The coefficient come from tests and theoretical results. Symbols: A1, A2, A3 [1] - A1: $Ma=1.1$, $Re=5 \cdot 10^5$; A2: $Ma=1.07$, $Re=10^6$; A3: $Ma=1.09$, $Re=2 \cdot 10^6$; A5, A6 [4] - theoretical distributions: $Ma=1.1$, $Ma=1.3$



Rys.3. Rozkłady temperatury na powierzchni ceramiki i metalowej ścianki łopatkii dla trzech grubości ceramiki (0,2, 0,3, 0,4 mm), oraz bez ceramiki (M^2); 0,5% powietrza chłodzącego. NATR: chłodzenie za pomocą wkładu perforowanego (5% powietrza do chłodzenia). C-0,3³ oraz M-0,3³ dla 2% powietrza chłodzącego. Współcz. przejm. ciepła: A3 wg rysa 2.

Fig. 3. Temperature distributions on the ceramic surface and on the metal wall of a vane; three thickness of coating (0,2, 0,3, 0,4 mm) and without a ceramic coat (M^2); 0,5% of cooling air. NATR: impingement insert with 5% of coolant air. C-0,3³ and M-0,3³; ceramic coating thickness: 0,3 mm and 2% of cooling air. Heat-transfer coefficient: A3 (fig. 2.)



Rys.4. Rozkłady temperatury na powierzchni ceramiki i metalowej ścianki łopatkki dla trzech grubości warstwy ceramicznej (0.2, 0.3, 0.4 mm), oraz bez ceramiki (M 1); 0.5% powietrza chłodzącego. C-0.4², oraz M-0.4² dla ubytków warstwy ceramicznej. Wsp. przejmowania ciepła alfa wg A2 (rys. 2.)

Fig. 4. Temperature distributions on the ceramic surface and on the metal wall of the vane; three values of coating thickness (0.2, 0.3, 0.4 mm) and without the ceramic coat (M 1); 0.5% of cooling air. C-0.4², and M-0.4²; for ceramic coating with places of rupture. Heat - transfer coeff.: A2 (Fig. 2.)