

Pomiar przepływu ciepła przy wykorzystaniu farby termoczułej

JEL: L97 DOI: 10.24136/atest.2018.427

Data zgłoszenia: 19.11.2018 Data akceptacji: 15.12.2018

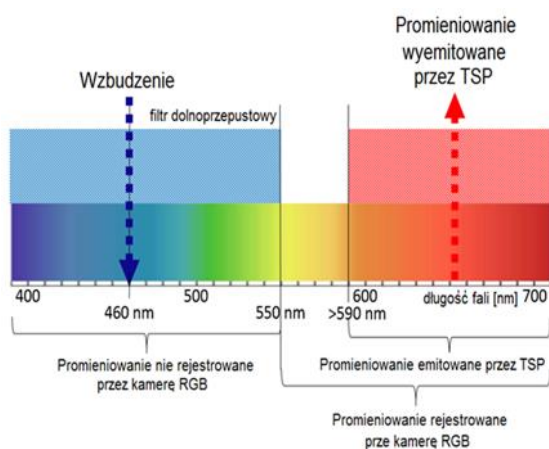
W artykule omówiony został problem pomiaru powierzchniowego rozkładu temperatury przy pomocy farby termoczułej. Przedstawiono proces pomiarowy, począwszy od kalibracji farby a skończywszy na pomiarach chłodzenia przy użyciu tej techniki.

Słowa kluczowe: farba termoczuła, pomiar temperatury, metoda TSP.

Wstęp

Prawie każda dziedzina wiedzy i działalności człowieka wymaga badań praktycznych oraz weryfikacji doświadczalnej [1]. W ostatnich latach obserwuje się ugruntowanie metod powierzchniowego pomiaru temperatury w badaniach naukowych oraz testach laboratoryjnych [2, 3]. Do metod tych można zaliczyć: farby termoczułe, termochromowe ciekłe kryształy oraz termografię. Metody te wyszły już ze swojego stadium wstępnego i obecnie stosowane są coraz szerszej w różnego rodzaju testach dzięki swojej rozdzielczości oraz dokładności. Farby termoczułe, będące w użyciu już od początków lat 90-tych, są obecnie standardową techniką pomiaru temperatury oraz używane są do temperaturowej kompensacji farb ciśnieniowych [4, 5, 6]. Pomiar rozkładu temperatury wykorzystywany jest nie tylko do sprawdzenia lokalizacji miejscowego przegrzewania się badanych obiektów [7, 8], ale również do badania przejścia laminarno-turbulentnej warstwy przyściennej [9, 10] oraz intensywności wymiany ciepła za pomocą chłodzenia strumieniowego [11, 12, 13, 14] lub efektywności filmu chłodzącego [15, 16].

Pomiar temperatury polega na pokryciu powierzchni badanej farbą termoczułą, a następnie wzbudzeniu jej za pomocą światła niebieskiego. W odpowiedzi na wzbudzenie, farba TSP emituje promieniowanie widzialne w paśmie światła czerwonego o intensywności zależnej od temperatury powierzchni (rys. 1). Dzięki odpowiedniej kalibracji [17, 18], jasność obrazu może zostać przeliczona na temperaturę powierzchni.

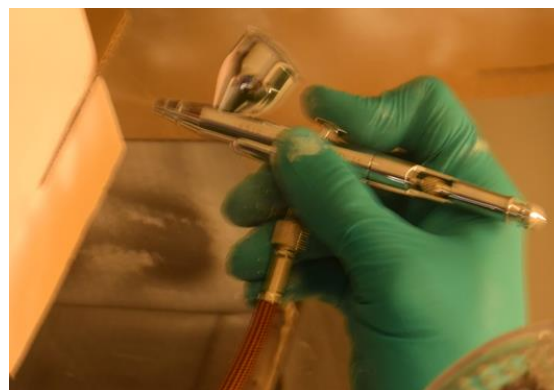


Rys. 1. Schemat ideowy działania farby termoczułej na tle spektrum światła widzialnego.

1. Kalibracja farby termoczułej

1.1. Przygotowanie próbek testowych

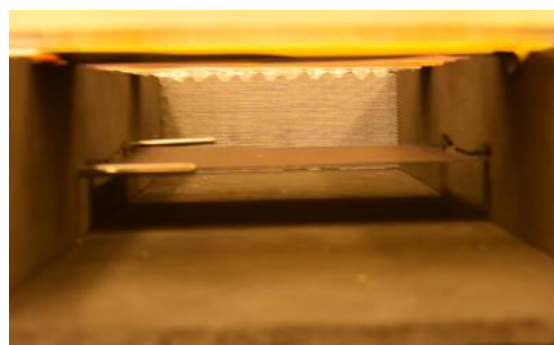
Farba termoczuła jest podobna w konsystencji do innego rodzaju farb. Składa się z pigmentu światłoaaktywnego oraz polimerowej osnowy. W celu uzyskania jak najlepszych wyników zalecane jest położenie równomiernej i jak najcieńszej warstwy farby. Mała grubość warstwy farby jest wymagana z powodu dodatkowego oporu cieplnego, jaki stanowi na powierzchni polimerowa warstwa osnowy farby. Takie parametry powłoki może zagwarantować malowanie natryskowe (rys. 2). Farba może być kładzona bezpośrednio na odtłuszczonej powierzchni jak również na specjalny podkład, który poprawia przyczepność farby do podłoża (powierzchnie gładkie, żywice), poprawia jakość wyników (zwiększa jasność świecenia farby wzbudzonej, dzięki zapewnieniu odpowiedniego tła) oraz poprawia jakość powierzchni (użyteczne przy badaniu elementów drukowanych metodą druku 3D). Podkłady często wymagają wygrzewania kilka godzin w podwyższonej temperaturze (rzędu 60°C-90°C). Farba termoczuła powinna schnąć co najmniej do połowy. Sposób malowania i schnięcia farby i podkładu zależy od poszczególnego ich rodzaju [19].



Rys. 2. Natryskowe nakładanie farby termoczułej TSP.

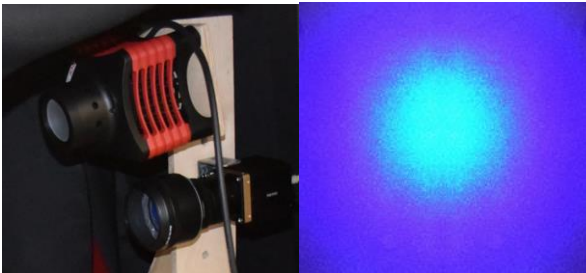
1.2 Pomiary w komorze kalibracyjnej

Po nałożeniu warstwy farby termoczułej i jej poprawnym wyschnięciu, próbka umieszczana jest w przepływowej komorze kalibracyjnej (rys. 3). Komora ma za zadanie zapewnienie stałej temperatury próbki.



Rys. 3. Próbkę z materiałem termoczułym we wnętrzu przepływowej komory kalibracyjnej.

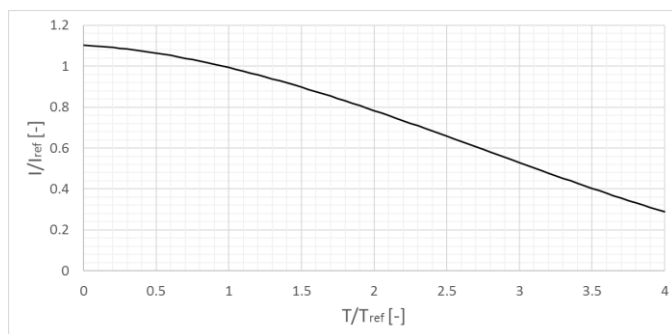
Po osiągnięciu zadanej temperatury, farba jest wzbudzana za pomocą światła niebieskiego i wykonywane jest jej zdjęcie w świetle widzialnym przy użyciu filtra dolnoprzepustowego, nieprzepuszczającego długości fal świetlnych krótszych od światła pomarańczowego lub żółtego (rys. 4). Zarejestrowane promieniowanie w paśmie czerwieni ma jasność zależną od temperatury.



Rys. 4. Lampa LED używana do wzbudzenia farby termoczułej oraz kamera RGB użyta do rejestracji obrazu (po lewo) oraz niebieskie światło wzbudzające farbę (po prawo).

Wykonując zdjęcia próbki dla różnych temperatur z zakresu 20°C-80°C (typowy zakres temperatur dla komercyjnych farb termoczułych) można wyznaczyć funkcję łączącą jasność świecenia farby z temperaturą powierzchni. Zdjęcia wykonywane są w ciemni, w celu usunięcia wpływu oświetlenia otoczenia i jego zmienności na pomiar. Dodatkowo chroni się w ten sposób próbki pokryte farbą termoczułą, gdyż farba ta jest fotodegradowalna i jej właściwości obniżają się na skutek kontaktu ze światłem UV (ok. 1% czułości na 1 godzinę ekspozycji).

W celu wyeliminowania niejednorodności oświetlenia oraz nierówności grubości farby, stosuje się funkcje kalibrujące, łączące ilorazy mierzonych wielkości: jasności i jasności odniesienia oraz temperaturę i temperaturę odniesienia (rys. 5). Za warunki odniesienia często przyjmuje się warunki otoczenia lub 20°C.



Rys. 5. Przykładowy przebieg funkcji kalibracyjnej, łączącej jasność świecenia próbki wzbudzonej z jej temperaturą.

1.3 Sposób wyliczania temperatury

W następstwie pomiaru jasności próbki w różnych temperaturach możliwe jest opisanie zależności pomiędzy temperaturą, a jasnością obrazu (lub ich iloczynami z wartościami odniesienia) za pomocą znanych funkcji analitycznych. Ze względu na charakter przebiegu typowych punktów pomiarowych, wielomian nadaje się dobrze do tej roli. Wystarczający jest wielomian stopnia trzeciego lub czwartego. Dzięki temu zabiegowi, otrzymywana jest zależność analityczna na temperaturę powierzchni, poprzez wyliczenie współczynników wielomianu a, b, c, d i e (1):

$$T = T_{ref} \cdot \left[a \cdot \left(\frac{I}{I_{ref}} \right)^4 + b \cdot \left(\frac{I}{I_{ref}} \right)^3 + c \cdot \left(\frac{I}{I_{ref}} \right)^2 + d \cdot \left(\frac{I}{I_{ref}} \right) + e \right] \quad (1)$$

W celu wyznaczenia temperatury w danym punkcie powierzchni, należy znać jasność odpowiedzi świetlnej farby na wzbudzenie oraz wartości temperatury odniesienia T_{ref} i jasności odniesienia I_{ref} .

2. Pomiary intensywności chłodzenia

2.1. Opis stanowiska testowego

Stanowisko do pomiaru intensywności chłodzenia składało się z umieszczonej poziomo folii grzewczej, rozpiętej pomiędzy dwoma miedzianymi szynami zasilającymi oraz płyty perforowanej umieszczonej pod folią [20]. Płyta perforowana umieszczona była na instalacji sprężonego powietrza, tak aby otwory w płycie wytwarzały strumienie chłodzące o znanej średnicy odniesienia, ilości oraz układzie. Badaniu podlegało 25 otworów w układzie 5x5. Odległość pomiędzy folią grzewczą, a płytą perforowaną była regulowana (rys. 6).



Rys. 6. Model CAD stanowiska pomiarowego intensywności chłodzenia (po lewej) oraz dolna część stanowiska wraz z płytą perforowaną (po prawej).

Układ optyczny złożony z lampy LED oraz kamery RGB (wzbudzenie oraz rejestracja farby) został umieszczony nad folią grzewczą. Górną część stanowiska oddzielono od oświetlenia zewnętrznego za pomocą czarnych kurtyn fotograficznych. Górna część folii została pokryta farbą termoczułą.

Folia grzewcza wykonana została z materiału przewodzącego prąd elektryczny o dużej rezystancji (stop Inconel). Folia była bardzo cienka, dodatkowo wykonano ją w wysokiej tolerancji grubości, aby zapewnić równomierne nagrzewanie.

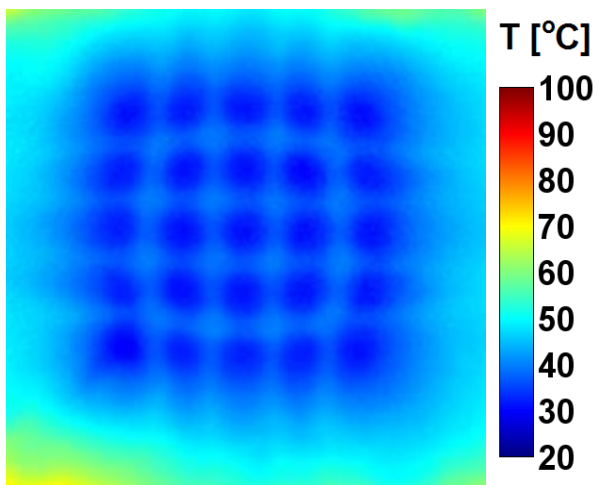
Przepływ powietrza regulowano za pomocą zaworu dostarczającego powietrze z instalacji, wyposażonego w przepływomierz. Dzięki pomiarowi ciśnienia i temperatury możliwe było wyznaczenie liczby Reynoldsa dla badanego przepływu.

2.2. Uzyskane wyniki

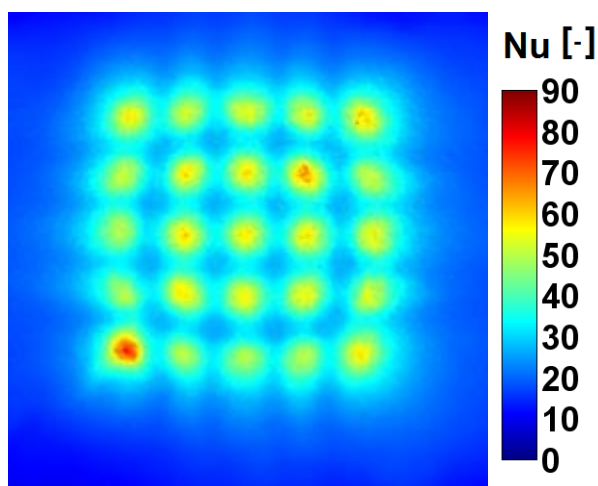
Testy intensywności chłodzenia przeprowadzono dla różnych poziomów mocy grzałki oraz dla różnych liczb Reynoldsa. Ze względu na użycie cienkiej folii, można było zaniedbać wpływ przewodzenia ciepła na finalny rozkład temperatury. Jedynym mechanizmem, mającym wpływ na powierzchniową dystrybucję temperatury było przejmowanie ciepła z folii grzewczej przez strumienie chłodzące. Znając jednostkowy strumień ciepła na jednostkę powierzchni folii grzewczej q [W/m²], powierzchnię czynną folii A [m²], współczynnik przewodności cieplnej powietrza chłodzącego k [W/m·K] oraz różnicę temperatur pomiędzy temperaturą powierzchni, a temperaturą strumienia chłodzącego ΔT [K], liczbę Nusselta można wyrazić zależnością (2):

$$Nu = \frac{q}{A \cdot \Delta T \cdot k} \quad (2)$$

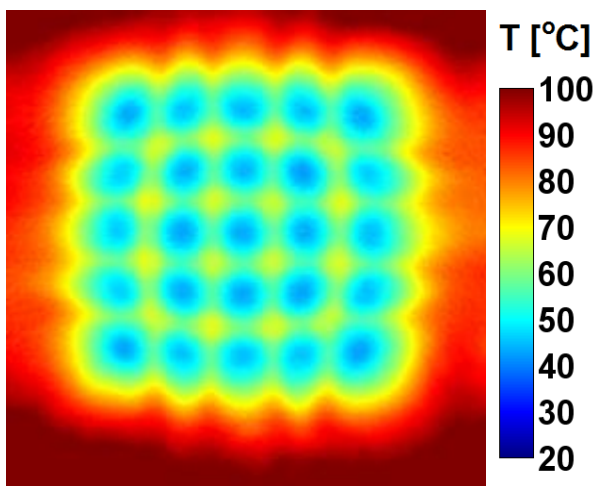
Zastosowanie różnych wartości mocy grzewczej skutkowało uzyskaniem różnych temperatur (rys. 7 i 9), jednakże rozkład liczby Nusselta (rys. 8 i 10) będącej głównym kryterium oceny intensywności wymiany ciepła w rozpatrywanym przypadku był identyczny – zmienił się tylko poziom dokładności pomiaru (mniej dokładny pomiar dla mniejszych różnic temperatury).



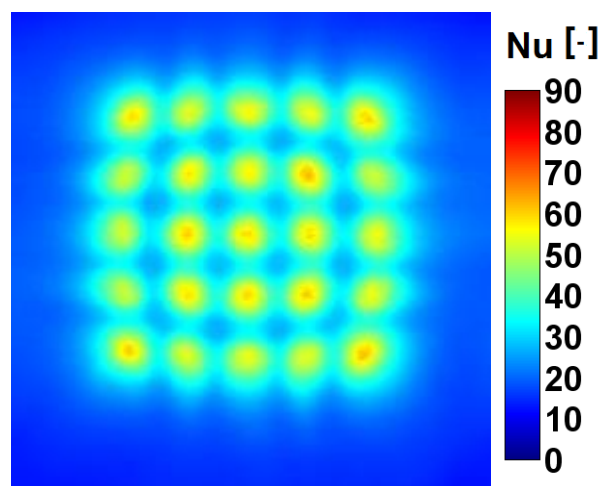
Rys. 7. Powierzchniowy rozkład temperatury uzyskany za pomocą farby termoczułej dla mocy grzewczej 200 W.



Rys. 8. Powierzchniowy rozkład liczby Nusselta uzyskany za pomocą farby termoczułej dla mocy grzewczej 200 W.

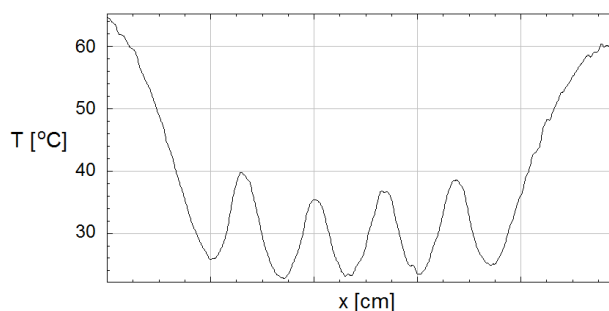


Rys. 9. Powierzchniowy rozkład temperatury uzyskany za pomocą farby termoczułej dla mocy grzewczej 200 W.



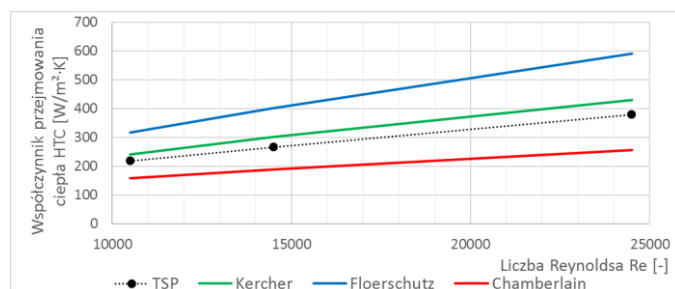
Rys. 10. Powierzchniowy rozkład liczby Nusselta uzyskany za pomocą farby termoczułej dla mocy grzewczej 550 W.

W przypadku testów dla różnych liczb Reynoldsa, wartości współczynnika przejmowania ciepła rosły razem z liczbą Re. Wyniki uwiadcniają również różnice w intensywności chłodzenia przez poszczególne otwory, spowodowane ich rozmieszczeniem w układzie.



Rys. 11. Przebieg temperatury powierzchni w poprzek środkowego rzędu otworów

Uzyskane wyniki porównano z danymi doświadczalnymi, uzyskanymi innymi metodami przez wcześniejszych badaczy. Porównanie z wynikami dostępnych korelacji wykazało, że uzyskane wyniki liczby Nusselta mieszczą się w zakresie przewidywanym przez korelacje podane przez Kercher et al. [21], Floerschütz et al. [22] oraz Chamberlaina [23]. We wszystkich zbadanych przypadkach trendy wykazywane przez uzyskane dane również były zgodne z dostępnymi danymi literaturowymi i korelacjami (rys. 12).



Rys. 12. Porównanie wartości współczynnika przejmowania ciepła na drodze doświadczalnej (TSP) z dostępnymi korelacjami.

Podsumowanie

Metoda pomiaru farbą termoczułą dzięki swojej rozdzielczości i dokładności oraz braku ingerencji w badany obiekt stanowi dosko-

nałą alternatywę dla badań przeprowadzanych punktowo (za pomocą termopar lub czujników termorezystancyjnych). Przy zastosowaniu poprawnego modelu wymiany ciepła możliwe jest również wyznaczenie liczby Nusselta. Daje to ogromne możliwości badań nad przepływami ciepła, zwłaszcza na polu projektowania i optymalizacji cieplnych urządzeń przepływowych oraz ich ruchomych elementów [24, 25, 26].

Bibliografia:

- Nowak J., Bezpieczeństwo samochodów i ruchu drogowego, WKiŁ, Warszawa 2004.
- Liu, T. and Sullivan, J.P., 2005, *Pressure and Temperature Sensitive Paints*, Springer, New York.
- Jahanmiri, M., 2011, "Pressure Sensitive Paints: The Basics & Applications," 2011:07, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.
- Cottingham, T., 2015, "Characterization and Optimization of Temperature-Sensitive Microbeads for Simultaneous Thermometry and Velocimetry for Fluid Dynamic Applications," M.Sc. thesis, University of Washington.
- Sullivan, J., 2009, "Molecular Sensors – Temperature Sensitive Paint", <https://slideplayer.com/slide/1675994/>
- Luminescent Paint," Ph.D. thesis, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics.
- Roslowicz, A. and Bednarczyk, P., 2017, "Analysis of Heat Transfer in a Supersonic Rocket Head," Transactions of the Institute of Aviation, No. 1 (246), pp.79-94.
- Fonov, S., Crafton, J., Goss, L., Jones, G., Fonov, S. and Tyler, C., 2005, "Multi-Aspect Solutions for Moving Vehicle Testing," RTO-MP-AVT-124-5, NATO Science and Technology Organisation.
- Stokes, N., Patel, S. and Hahn, M., 2012, "Boundary Layer Transition Detection Using Temperature Sensitive Paint in the ARA Transonic Wind Tunnel," ICAS 2012-3.4.2, 28th International Congress of the Aeronautical Sciences, Brisbane, Australia.
- Borovoy, V., Mosharov, V., Noev, A. and Radchenko, V., 2012, "Temperature Sensitive Paint Application for Investigation of Boundary Layer Transition in Short-Duration Wind Tunnels," Progress in Flight Physics 3, pp. 15-24.
- Crafton, J.W., 2004, "The Impingement of Sonic and Sub-Sonic Jets onto a Flat Plate at Inclined Angles," Ph.D. Thesis, Purdue University.
- Crafton, J., Ladchenko, N., Guille, M. and Sullivan, P., "Application of Temperature and Pressure Sensitive Paint to an Obliquely Impinging Jet," 37th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, AIAA-99-0387, Reno, USA.
- Liu, Q., 1993, "Study of Heat Transfer Characteristics if Impinging Air Jet Using Pressure and Temperature Sensitive Paint," B.S. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics.
- Gao, L., 2003, "Effect of Jet Hole Arrays Arrangement on Impingement Heat Transfer," M.Sc. thesis, Louisiana State University.
- Zuniga, H. A., 2009, "Study of Film Cooling Effectiveness: Conical, Trenched and Asymmetrical Shaped Holes," Ph.D. thesis, University of Central Florida, Orlando.
- Wright, L. M., Gao, Z., Varvel, T. A., and Han, J.-C., "Assessment of Steady State PSP, TSP, and IR Measurement Techniques for Flat Plate Film Cooling," *Heat Transfer: Volume 3*, ASME, 2005, pp. 37-46.
- Kurits, I. and Norris, J. D., 2011, "Temperature-Sensitive Paint Calibration Methodology Developed at AEDC Tunnel 9," AIAA 2011-851.
- Schramm, J.M., Hannemann, K., Ozawa, H., Beck, W. and Klein, Ch., 2014, "Development of Temperature Sensitive Paints for the High Enthalpy Shock Tunnel Goettingen," 8th European Symposium on Aerothermodynamics for Space Vehicles, Lisbon.
- Product catalog*, 2017, Innovative Scientific Solutions Inc.
- Jeziorek, Ł., 2017, "Rozwój Metodologii TSP (Farba Termoczuła) i Potencjału Badań Laboratoryjnych z Nią Związanych," (ang. Development of Thermal Sensitive Paint Methodology and Its Research Capabilities), Sprawozdanie z pracy badawczej nr 2017/PS/01, Institute of Aviation, Warsaw.
- Kercher, D.M., Tabakoff W., 1969, "Heat Transfer by a Square Array of Round Air Jets Impinging Perpendicular to a Flat Surface Including the Effect of Spent Air," ASME paper 69-GT-4.
- Floerschuetz, L.W., Metzger D.E., Truman C.R., 1981, "jet Array Impingement with Crossflow – correlation of streamwise Resolved Flow and Heat Transfer Distributions," NASA Contractor Report 3373.
- Chamberlain, J.E., 1966, "Heat Transfer Between a Turbulent Round Jet and a Segmented Plate Perpendicular to It," M.Sc. thesis, Newark College of Engineering.
- Szafran, K., Shcherbonos, O. and Ejmoki, D., 2014, "Effect of duct shape on ducted propeller trust performance," Transactions of the Institute of Aviation, No. 4 (237), pp. 85-91.
- Ruchała, P. and Szafran, K., 2016, "Praktyczne Aspekty Zastosowania Otunelowanych Śmigieł Pchających," (ang. The Aspects of Practical Application of Ducted Fans), Transactions of the Institute of Aviation, No. 3 (244), pp. 257-266.
- Navarra, K. R., 1997, "Development of the Pressure-Sensitive-Paint Technique for Advanced Turbomachinery Applications," Ms.C. thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University.

Heat transfer measurements using thermal sensitive paint

Paper discussed the measurements of steady state heat transfer during jet impingement cooling. Particular attention was given to the thermal sensitive paint calibration process. Obtained results were briefly described and compared to available test data. Authors recommends the thermal sensitive paint measuring technique as credible and accurate method for heat transfer research.

Keywords: thermal sensitive paint, temperature measurement, method TSP.

Autorzy:

mgr inż. Łukasz JEZIOREK – EDC Polska – samodzielny inżynier
 dr inż. Patryk WIDERA – EDC Polska – kierownik Laboratorium Mechaniki Płynów i Wymiany Ciepła
 dr hab. inż. Krzysztof SZAFRAN – adiunkt Instytutu Lotnictwa, /aerodynamika i dynamika obiektów latających, bezpieczeństwo lotów, ratownictwo / specjalista budowy i pilotażu poduszkowców
 dr inż. Paweł SKALSKI – adiunkt Instytutu Lotnictwa, Centrum Transportu i Konwersji Energii, Zakład Transportu, pawel.skalski@ilot.edu.pl