

# Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym

## Modern material technologies in aerospace industry

## Nowoczesne pokrycia barierowe na krytyczne części silnika

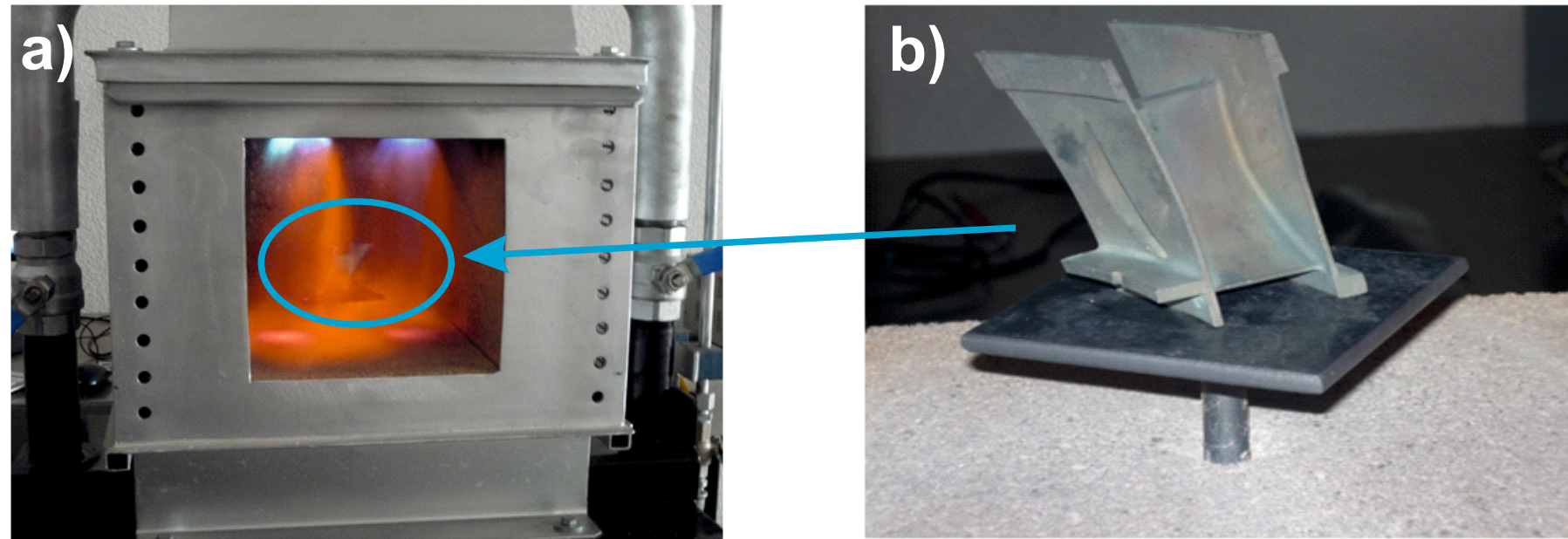
### Modern barrier covers on critical engine parts

Politechnika Lubelska, Politechnika Rzeszowska, Politechnika Śląska, Politechnika Warszawska, Uniwersytet Rzeszowski

#### Wyniki badań Results

### 1. Metoda i zakres wykonywanych badań termograficznych

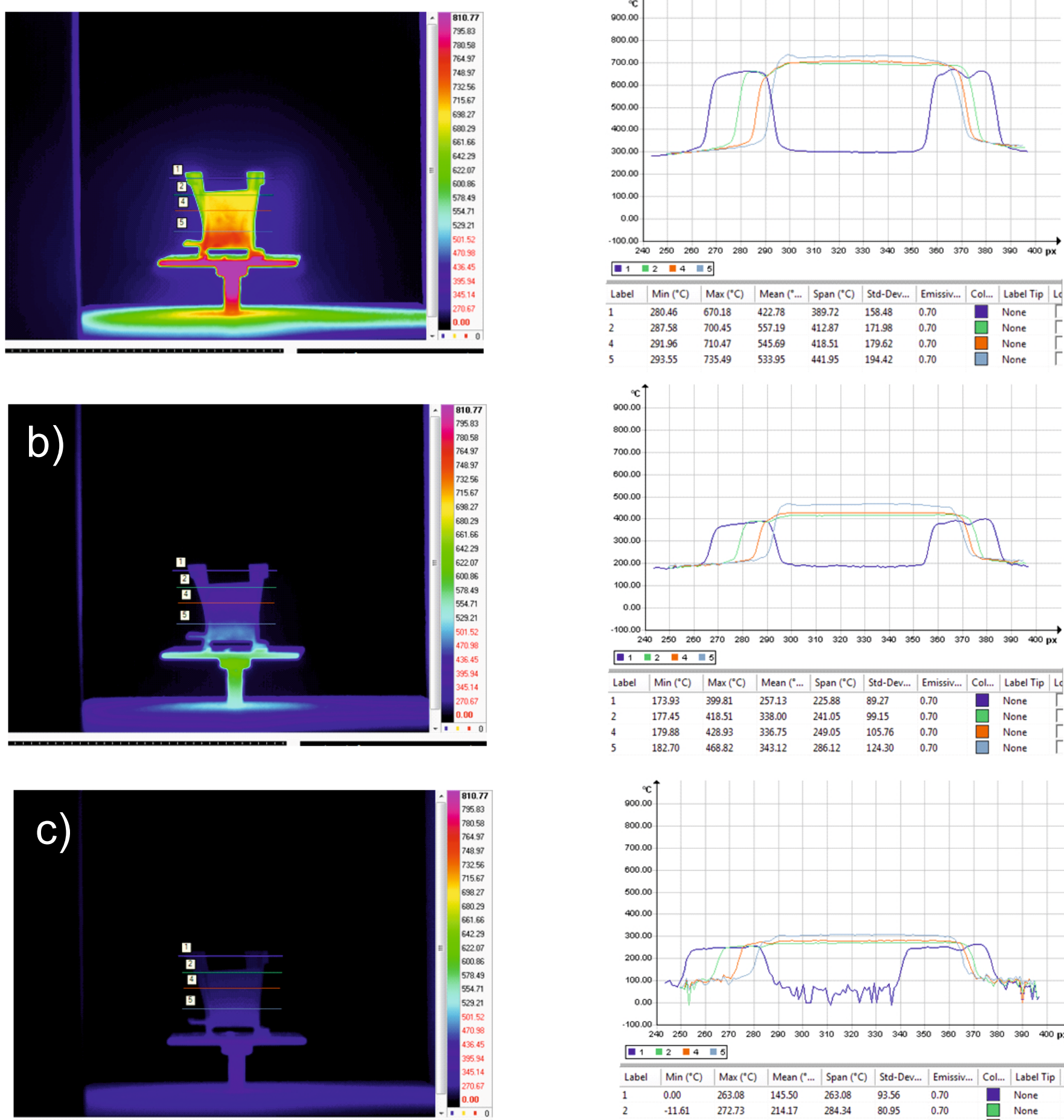
Pomiary termograficzne zostały wykonane dla łopatek kierunkowych turbiny silnika odrzutowego podgrzewanych dynamicznie w komorze imitującej komorę spalania silnika odrzutowego (Rys. 1.a i b) wyposażonej w automatyczny stolik obrotowy.



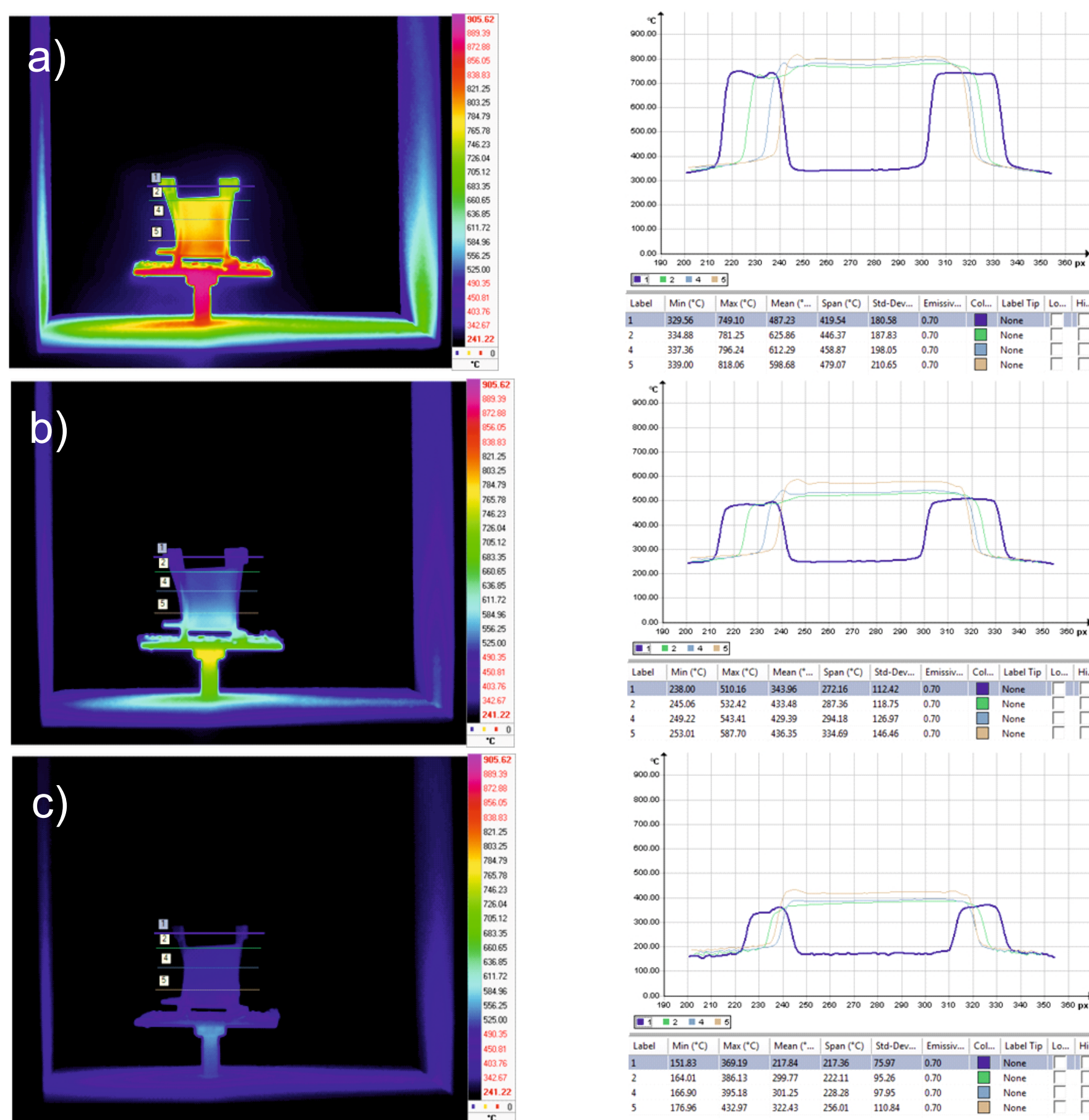
Rys. 1. Wysokotemperaturowe stanowisko grzewcze: a) widok zewnętrzny, b) wewnętrzny stolik obrotowy  
Fig. 1. High temperature heating position: a) external view, b) internal rotary table

Zastosowanie sterowanego stolika obrotowego umożliwiło obserwację wszystkich powierzchni badanego elementu w czasie rzeczywistym (kąt obrotu 0 - 360°). Pomiar rozkładu pola temperaturowego wykonany został przy użyciu wysokorozdzielczej kamery termograficznej Flir Sc7000 wyposażonej w obiektyw 50 mm, ustawionej w odległości 1,35m od badanego obiektu. Zakres temperaturowy kamery został ustawiony na 200...1500°C. Pomiar wykonywany był z częstotliwością 25 Hz dla czterech czasów integracji matrycy CCD. Do wykonania pomiarów kalibracyjnych zostały wykorzystane:

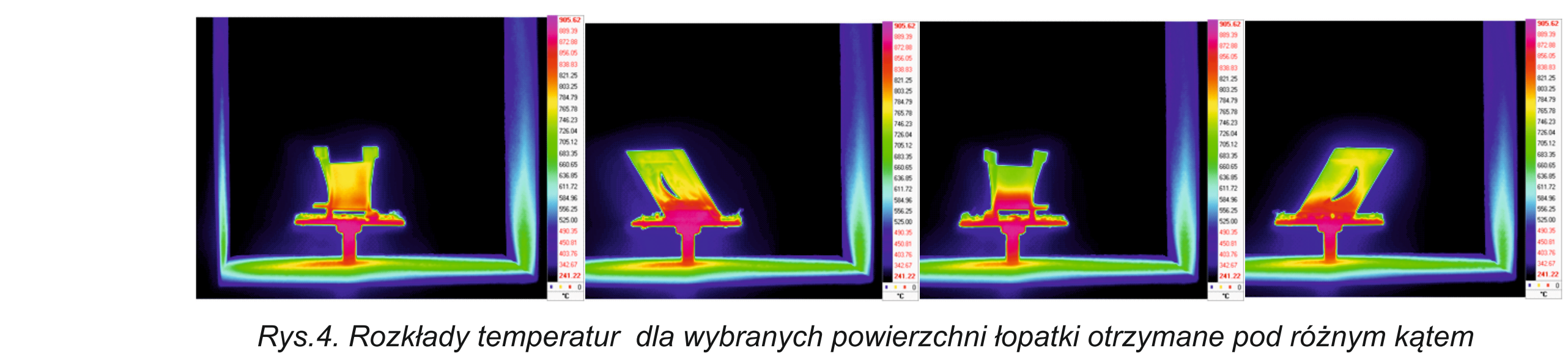
- Czujnik głowicowy z osłoną ceramiczną DTR TTKC-22 wyposażony w termoparę typu K, pracujący w zakresie temperatur -40...1200°C.
  - Pirometr Sonel DIT 500 z optyką 50:1, pracujący w zakresie temperatur -50...1600°C, wyposażony w sondę typu K pracującą w zakresie -50...1370°C.
- Po przeprowadzeniu pomiarów termograficznych dla dwóch rodzajów łopatek kierunkowych, bez bariery TBC (Rys. 2.a,b,c) oraz z barierą (Rys. 3.a,b,c) otrzymano termogramy obrazujące rzeczywisty rozkład pola temperaturowego na ich powierzchni.



Rys. 2. Termogramy z profilem liniowym dla łopatek bez pokrycia: a) po czasie T=0s, b) po czasie T=74s, c) po czasie T=180s  
Fig. 2. Thermograms with the linear profiles for the blades without barrier: a) after time T=0, after time T=74s, c) after time T=180s



Rys. 3. Termogramy z profilem liniowym dla łopatek z pokryciem: a) po czasie T=0s, b) po czasie T=74s, c) po czasie T=180s  
Fig. 3. Thermograms with the linear profiles for the blades with barrier: a) after time T=0, after time T=74s, c) after time T=180s



Rys. 4. Rozkłady temperatur dla wybranych powierzchni łopatek otrzymane pod różnym kątem

Przeprowadzone pomiary termograficzne rozkładu pola temperaturowego dla wybranych powierzchni łopatek zostały wykonane w celu uzyskania danych do obliczenia objętościowego rozkładu temperatury w badanej łopacie. Rys. 4 przedstawia uzyskany obraz termograficzny dla czterech położenia łopatek (0°, 90°, 180°, 270°) względem obiektywu kamery.

### 2. Obliczenia numeryczne termonaprzeżeń i rozkładów temperatur w łopatkach bez i z pokryciami ochronnymi

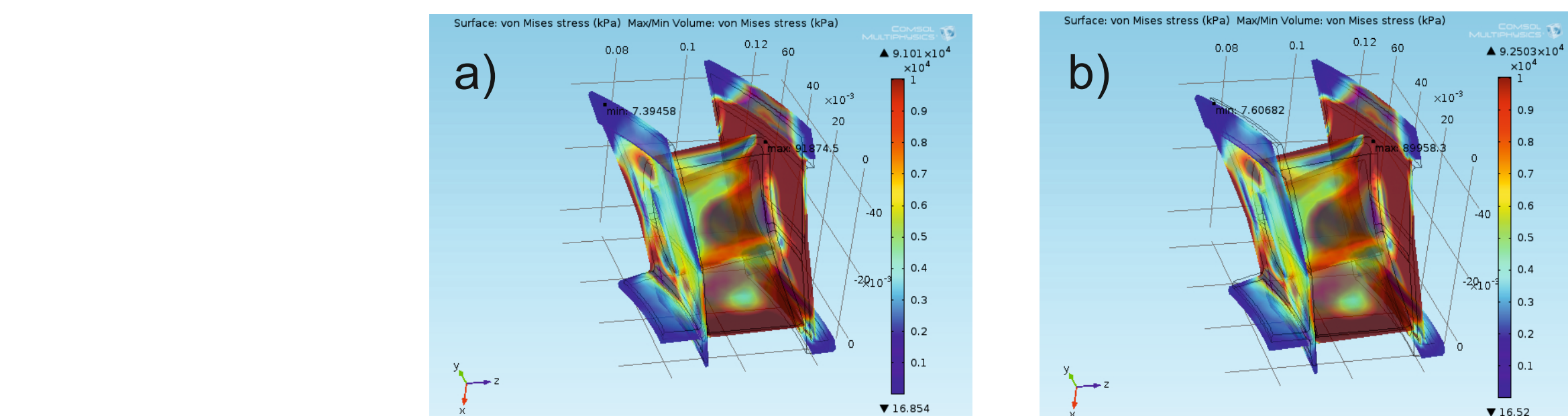
Obliczenia rozkładów naprzeżeń wiążą się z analizą rozkładów temperatury oraz kierunkiem przemieszczeń elementów łopatek pod wpływem naprzeżeń wewnętrznych.

Oprogramowanie COMSOL umożliwia obliczenie termonaprzeżeń dla dowolnego obiektu po uprzednio zdefiniowanej geometrii i własnościach budowy[1]

Poniżej przedstawiono dane rozkładu termonaprzeżeń (von Mises stresses) generowanych gradientami temperatur zmierzonych przez wysokorozdzielczą kamerę termograficzną w 130 sekundzie ochładzania dla obu przypadków łopatek bez pokrycia (Rys. 5.a) oraz z pokryciem TBC (Rys. 5.b)

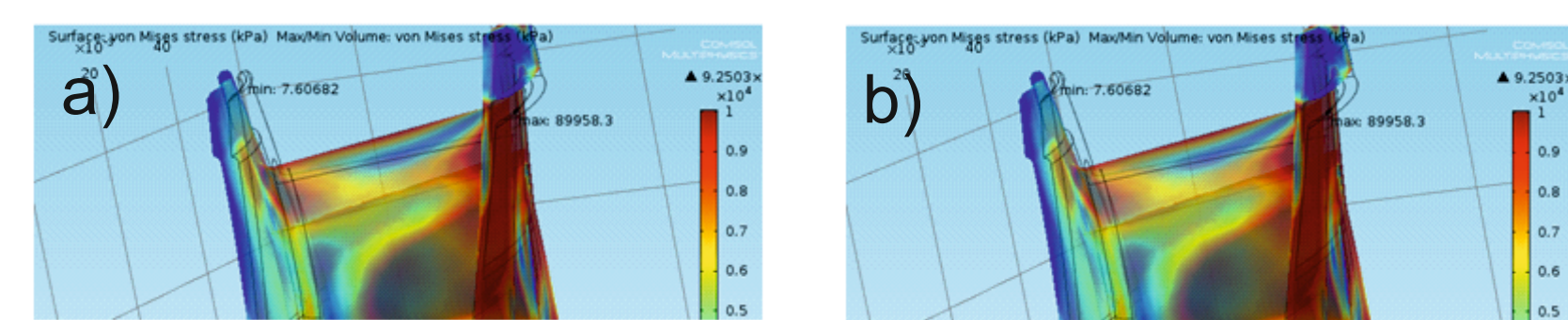
Literatura:

- Comsol Multiphysics Modeling Guide v3.2
- K. Maś, M. Woźny, S. Prochorenko, Katarzyna Kashpor, Eugeniusz Szeregij, Sposób bezdotykowej kontroli jednorodności ochronnych powłok powierzchniowych, nr P.403346-zgłoszenie patentowe



Rys. 5. Rozkład naprzeżeń uzyskany w przestrzennym modelu łopatek: a) bez pokrycia, b) z pokryciem  
Fig. 5. Stress distribution obtained for a spatial model of the blade: a) without cover, b) with cover

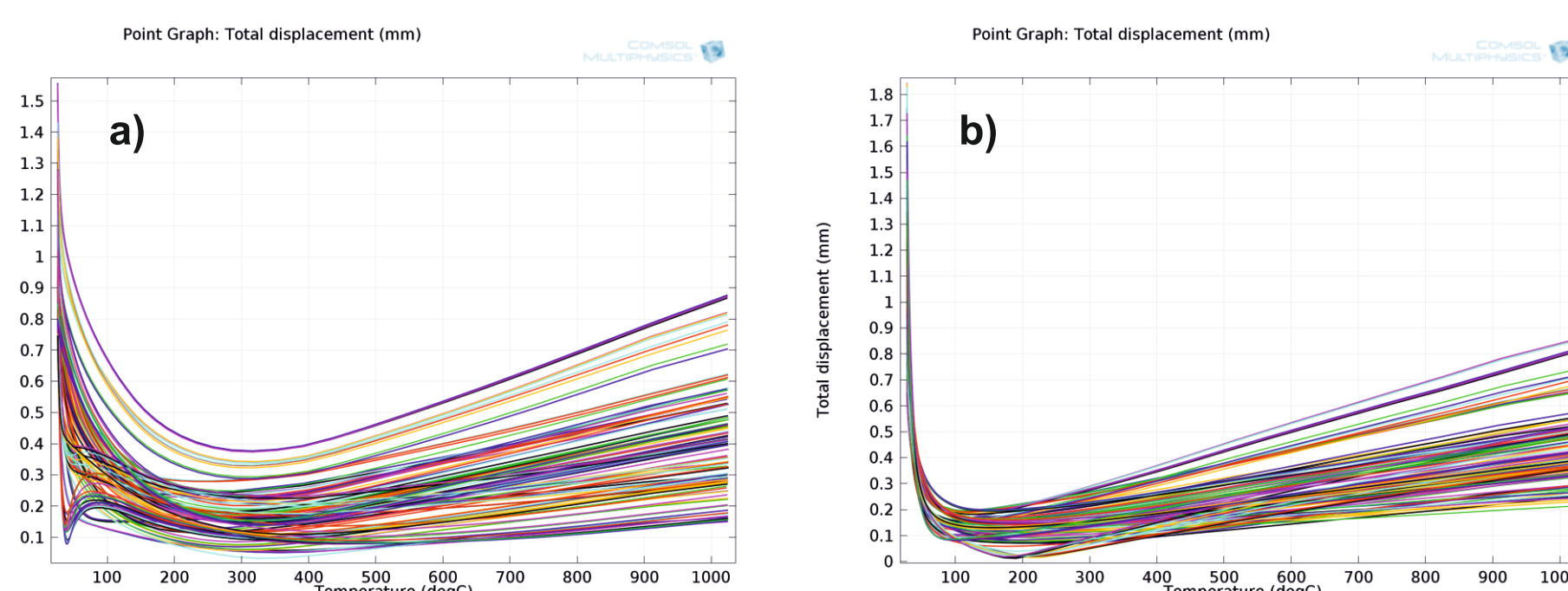
Objętościowy rozkład naprzeżeń w łopatkach z pokryciem i bez różni się nieznacznie, jednak w punktach maksymalnych naprzeżeń w pierwszej łopacie (Rys. 6.a, 91874,5kPa) oraz w drugiej łopacie (Rys. 6.b, 89958,3kPa) ma miejsce około 2% różnica wartości.



Rys. 6. Punkty maksymalnych naprzeżeń  
Fig. 6. Points of maximum stress

W przypadku łopatek bez pokryć wartość maksymalnego naprzeżenia jest o 2 000kPa większa niż w przypadku łopatek z pokryciem TBC.

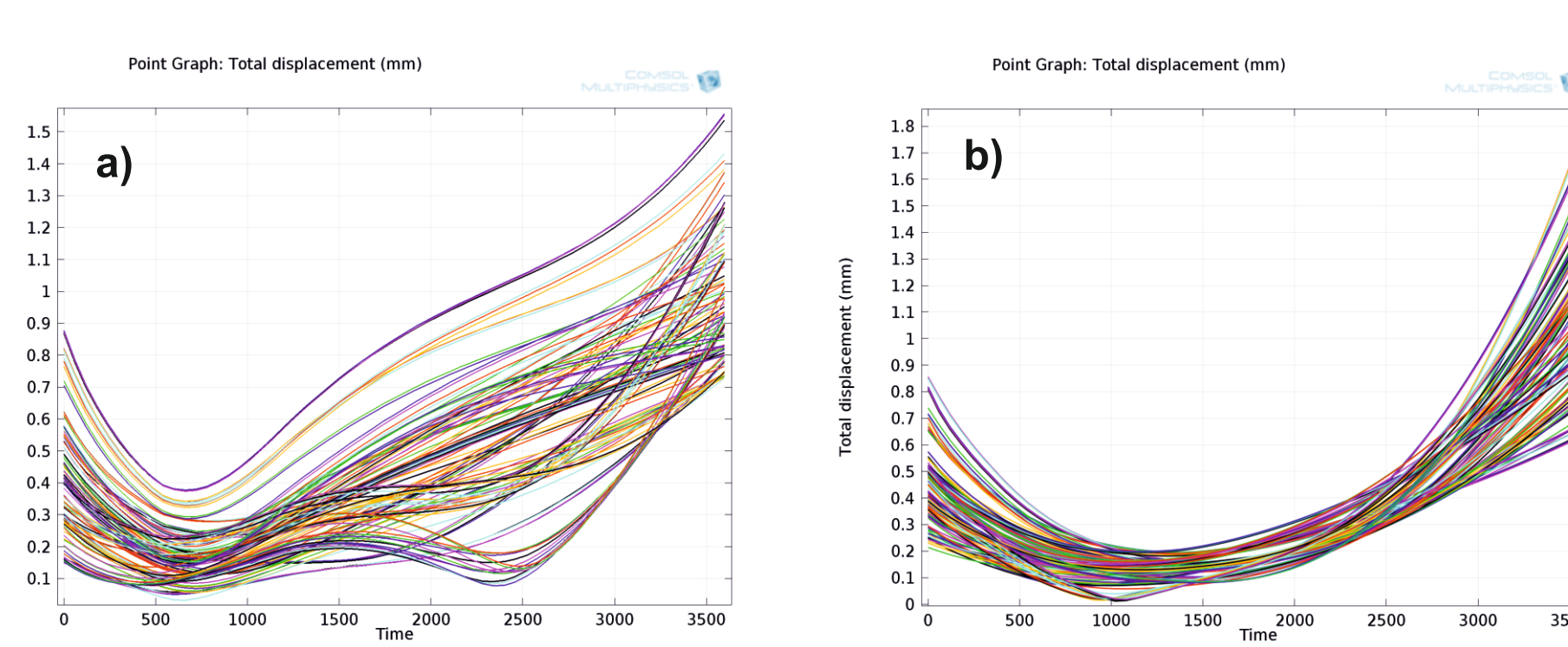
Rozkład temperatur na powierzchni łopatek bez bariery (Rys. 7.a) i z barierą (Rys. 7.b) wykazuje niewielkie różnice w obu przypadkach jednak różnica deformacji wynikająca z termonaprzeżeń jest widoczna w obu przypadkach (krzywa konturowa zaznaczona na obu wykresach)



Rys. 7. Całkowite przesunięcie wybranych punktów (mm) w funkcji temperatury: a) bez pokrycia, b) z pokryciem  
Fig. 7. Total displacement of the selected points (mm) as a function of temperature: a) without cover, b) with cover

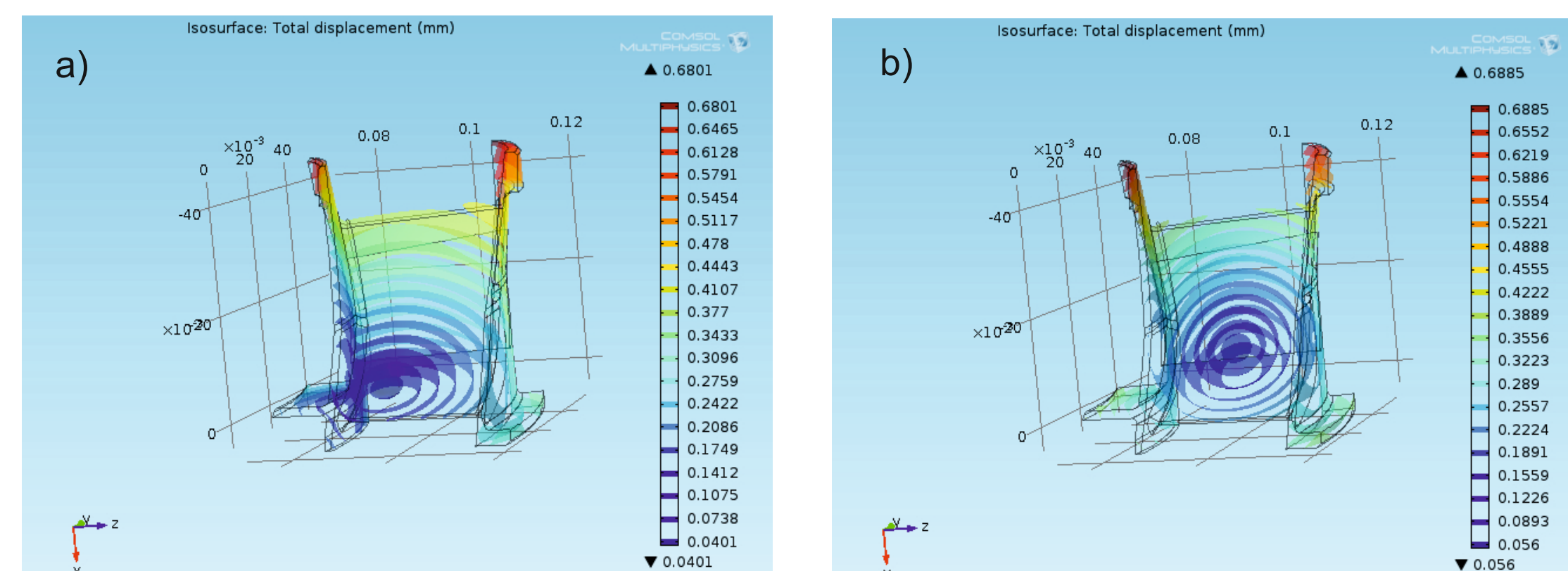
Na Rys. 7 zostały przedstawione przesunięcia całkowite wybranych punktów odpowiednio dla łopatek bez pokrycia oraz łopatek z pokryciem ochronnym. Zauważono znaczne różnice przesunięć wybranych odpowiednio punktów w funkcji temperatury, szczególnie widoczne w zakresie niższych temperatur (20-200°C). Widoczny jest tutaj wkład pokrycia ochronnego, ograniczający zakres przemieszczeń dla odpowiednich wybranych punktów łopatek.

Podobne wyniki uzyskano dla analizy całkowitego przesunięcia wybranych punktów łopatek w funkcji czasu ogrzewania/ochładzania łopatek (Rys. 8.a,b).



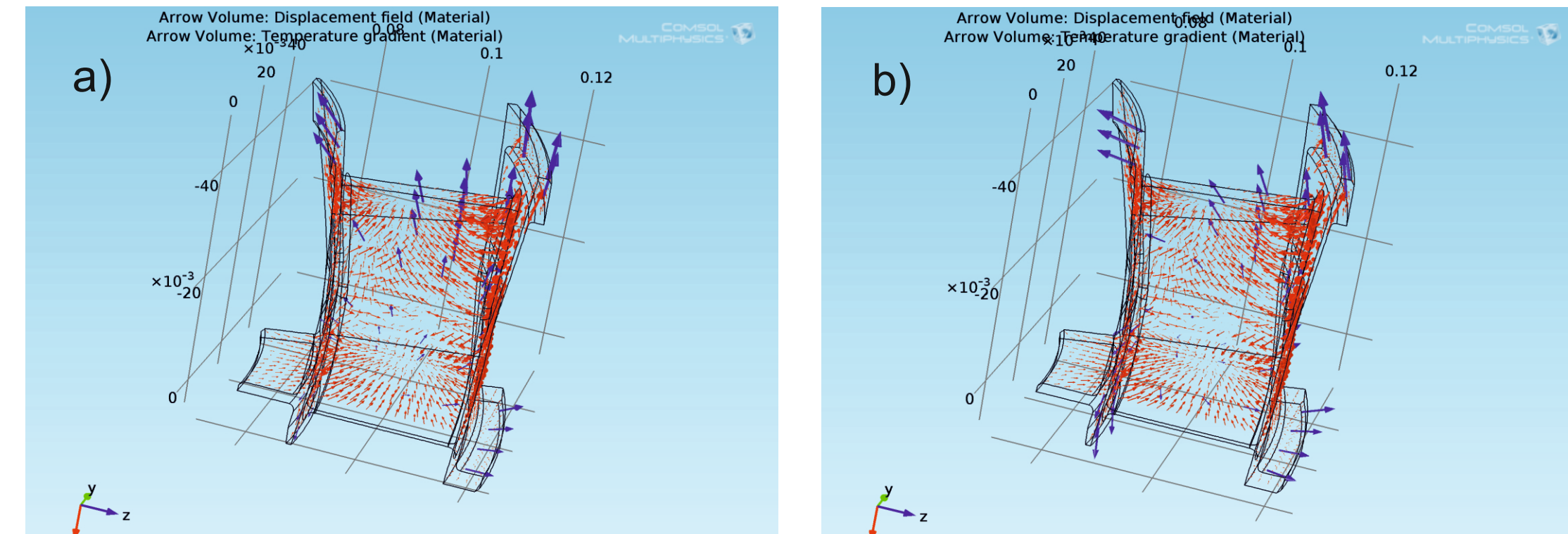
Rys. 8. Całkowite przesunięcie wybranych punktów (mm) w funkcji czasu: a) bez pokrycia, b) z pokryciem  
Fig. 8. Total displacement of the selected points (mm) as a function of time: a) without cover, b) with cover

Z analizy Rys. 9 widać znaczny wkład warstwy ochronnej na zmniejszenie amplitudy maksymalnych przesunięć wybranych punktów łopatek.



Rys. 9. Izo powierzchni o jednakowym przesunięciu całkowitym dla łopatek: a) bez pokrycia, b) z pokryciem  
Fig. 9. Iso surfaces with equal total displacement for the blades: a) without cover, b) with cover

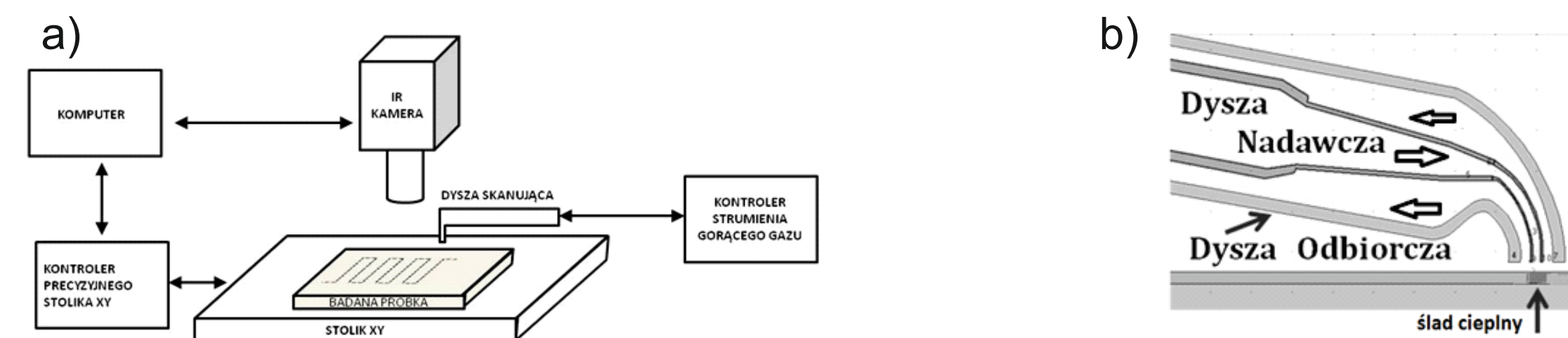
Analizując przypadek rozkładu gradientów temperatur otrzymano po obliczeniach znaczącą różnicę w przesunięciach dla obu rodzajów łopatek (wartość oraz kierunek przesunięć dla łopatek z pokryciem jest jednorodny-jednokierunkowy (Rys. 10.b)). W przypadku łopatek bez pokrycia mamy do czynienia z promienistym rozchodzeniem się materiału względem środka łopatek (Rys. 8.a)



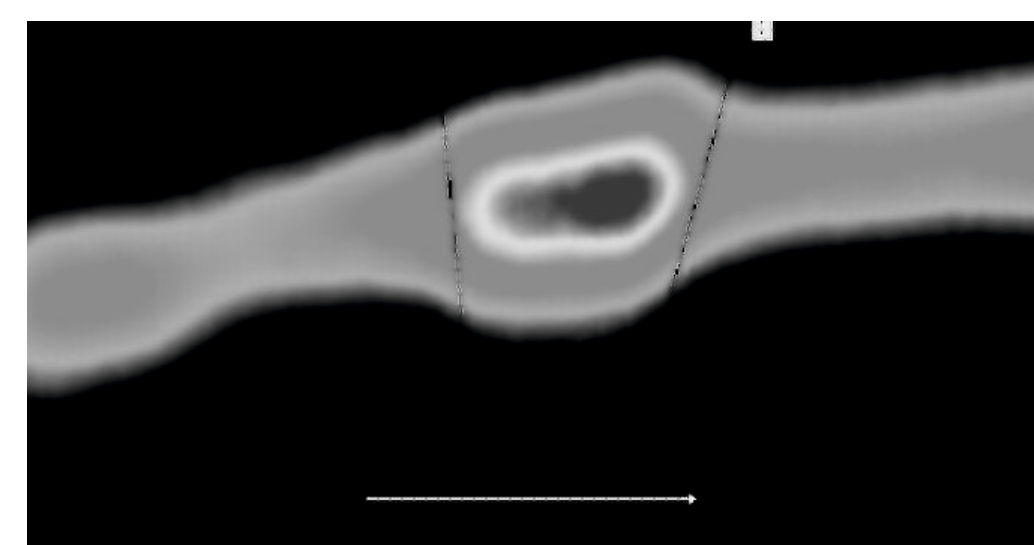
Rys. 10. Wykresy gradientów temperatury (czerwone strzałki) oraz pola przesunięć (niebieskie strzałki) dla łopatek  
Fig. 10. Diagrams of the temperature gradients and displacement's fields for the blades: a) without cover, b) with cover

### 3. Termograficzna metoda rejestracji ukrytych 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. 11. Schemat systemu do kontroli jednorodności powłok: a) schemat blokowy, b) schemat budowy dyszy skanującej.  
Fig. 11. Diagram of the system to control the uniformity of coatings: a) block diagram b) diagram of the scanning nozzle.

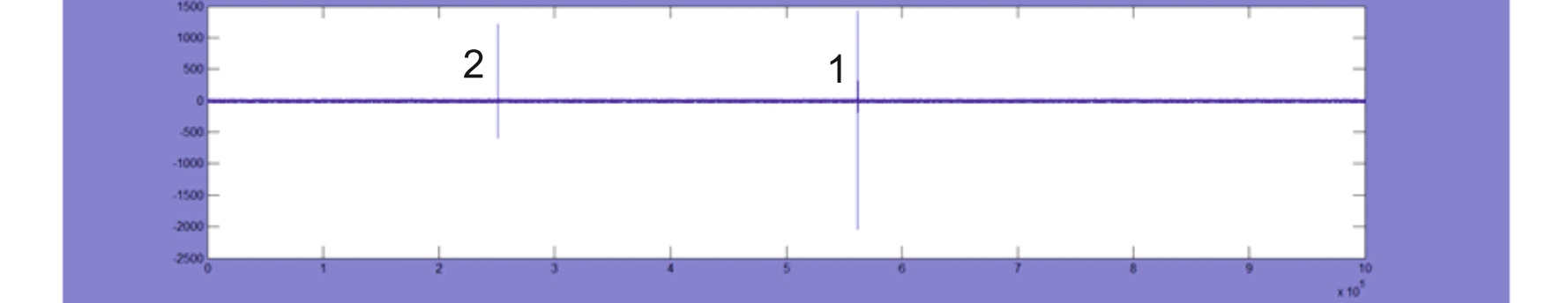


Rys. 12. Miejsce zawierające ukryty defekt w postaci klina lawsanowego, zarejestrowane na badanej powierzchni przez skanującą dyszę.  
Fig. 12. Place containing a hidden defect in the form of a "lawsan" wedge, recorded on the test surface by scanning the nozzle.

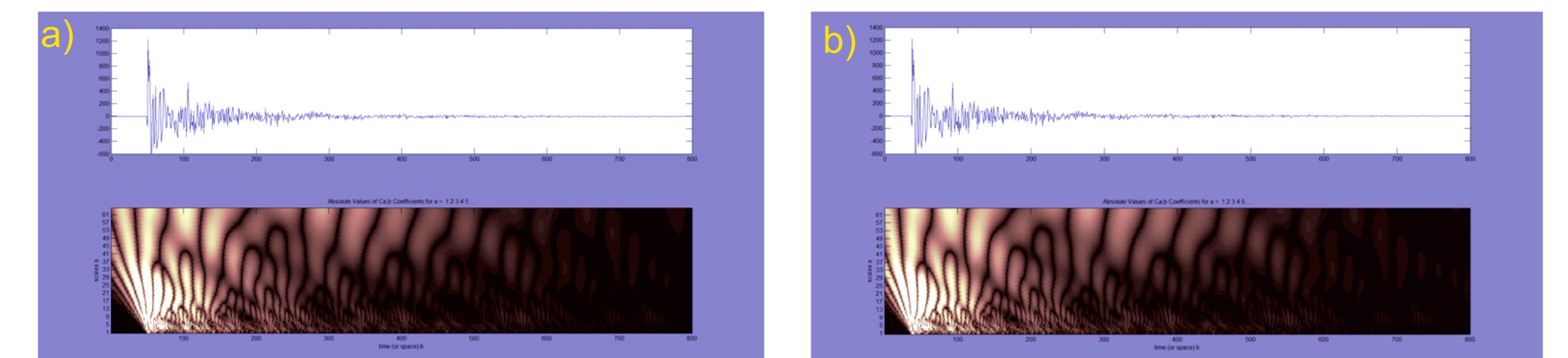
### 4. Analiza sygnału EA

Celem pracy jest optymalizacja doboru narzędzi dekompozycji czasowo-częstotliwościowej sygnału emisji akustycznej (EA) dla identyfikacji źródeł generujących sygnał EA w materiałach, w warunkach przyłożonego naprzeżenia zewnętrznego. Identyfikacja źródeł umożliwi opis zjawisk degradacji struktury materiałów stosowanych w przemyśle lotniczym, poddanych obciążeniu w podwyższonych temperaturach.

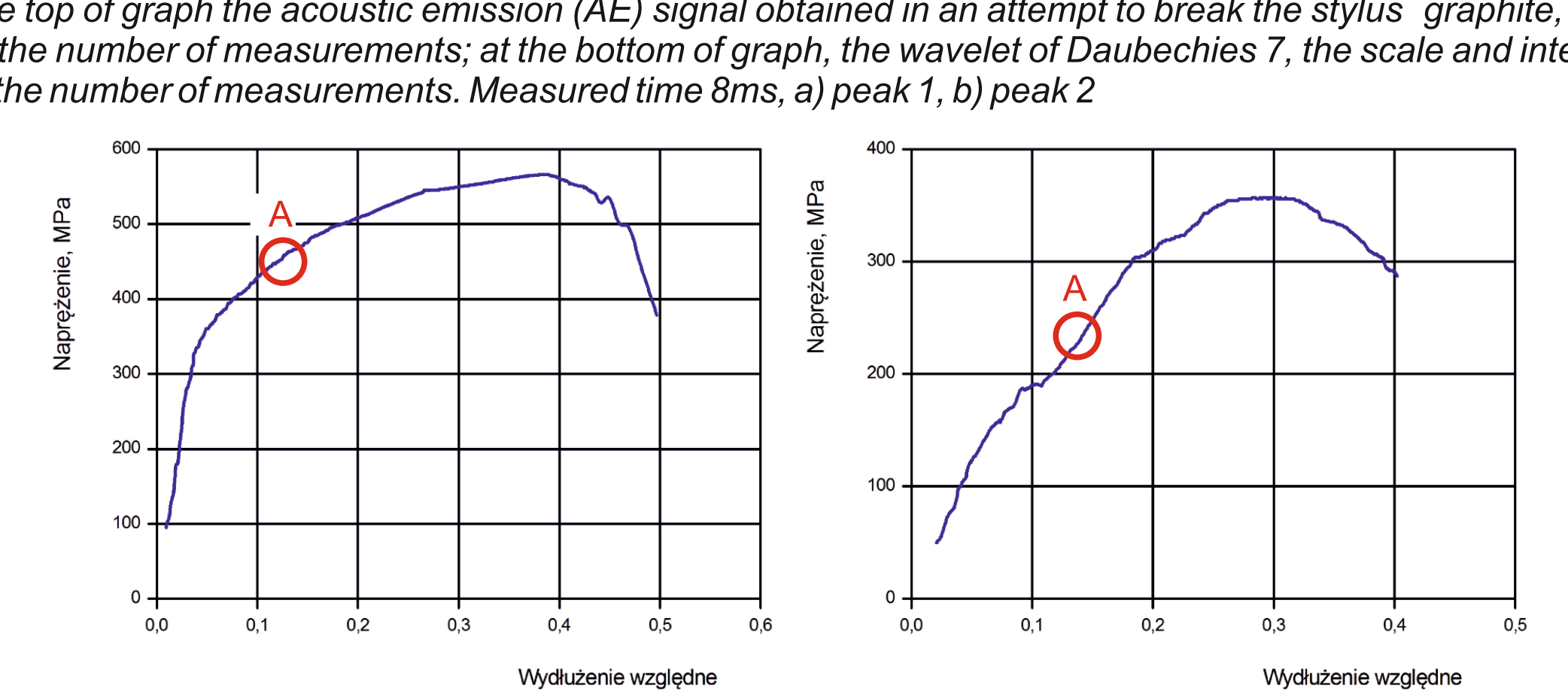
Analizowano sygnał EA generowany przez próbki ze stali X6CrNiTi18-10 podczas statycznej próby rozciągania w zakresie odkształceń plastycznych (w stanie jednorodnych naprzeżeń) w temperaturze 20 °C oraz w temperaturze 400 °C.



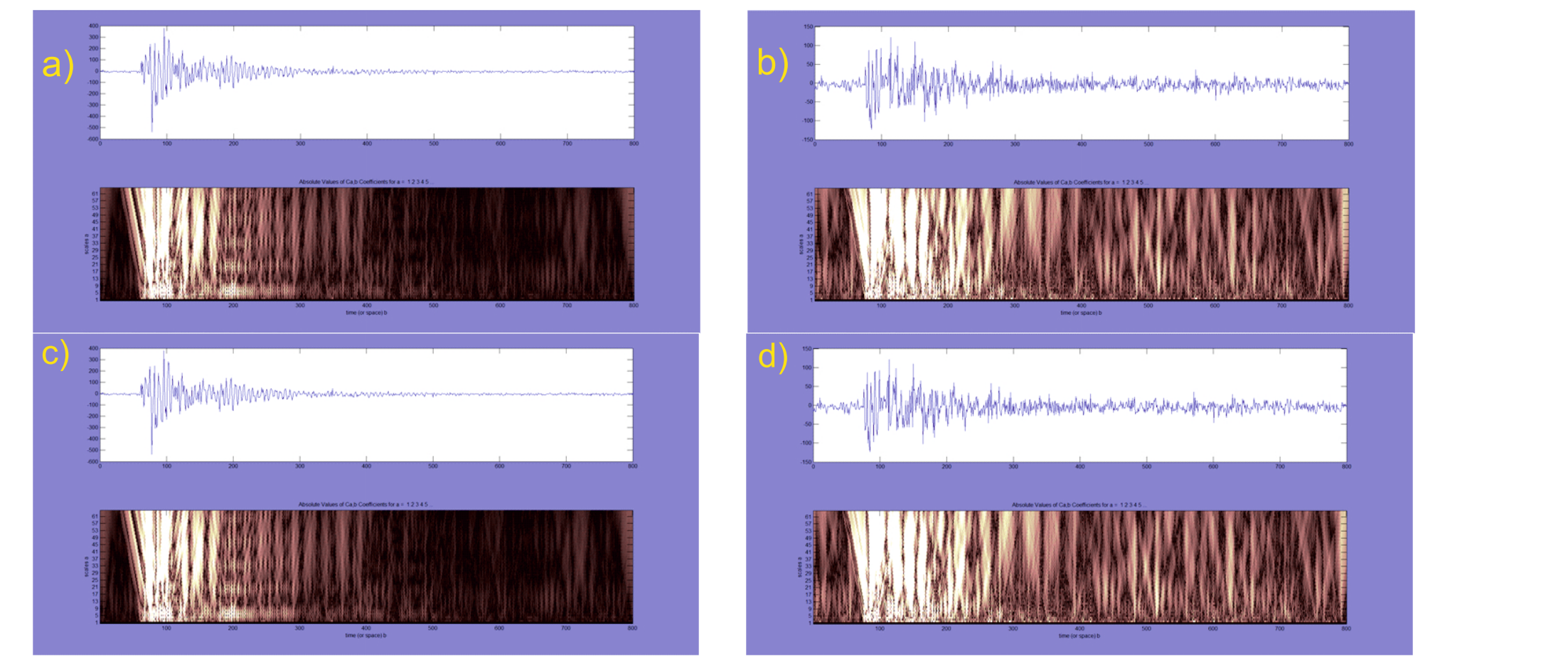
Rys. 13. Sygnał emisji akustycznej uzyskany w dwukrotnej próbie wzorcowania, pik 1 - pik 2 - złamanie rysika grafitowego  
Fig. 13. Acoustic emission signal obtained in the calibration, peak 1, peak 2 - breaking the stylus graphite



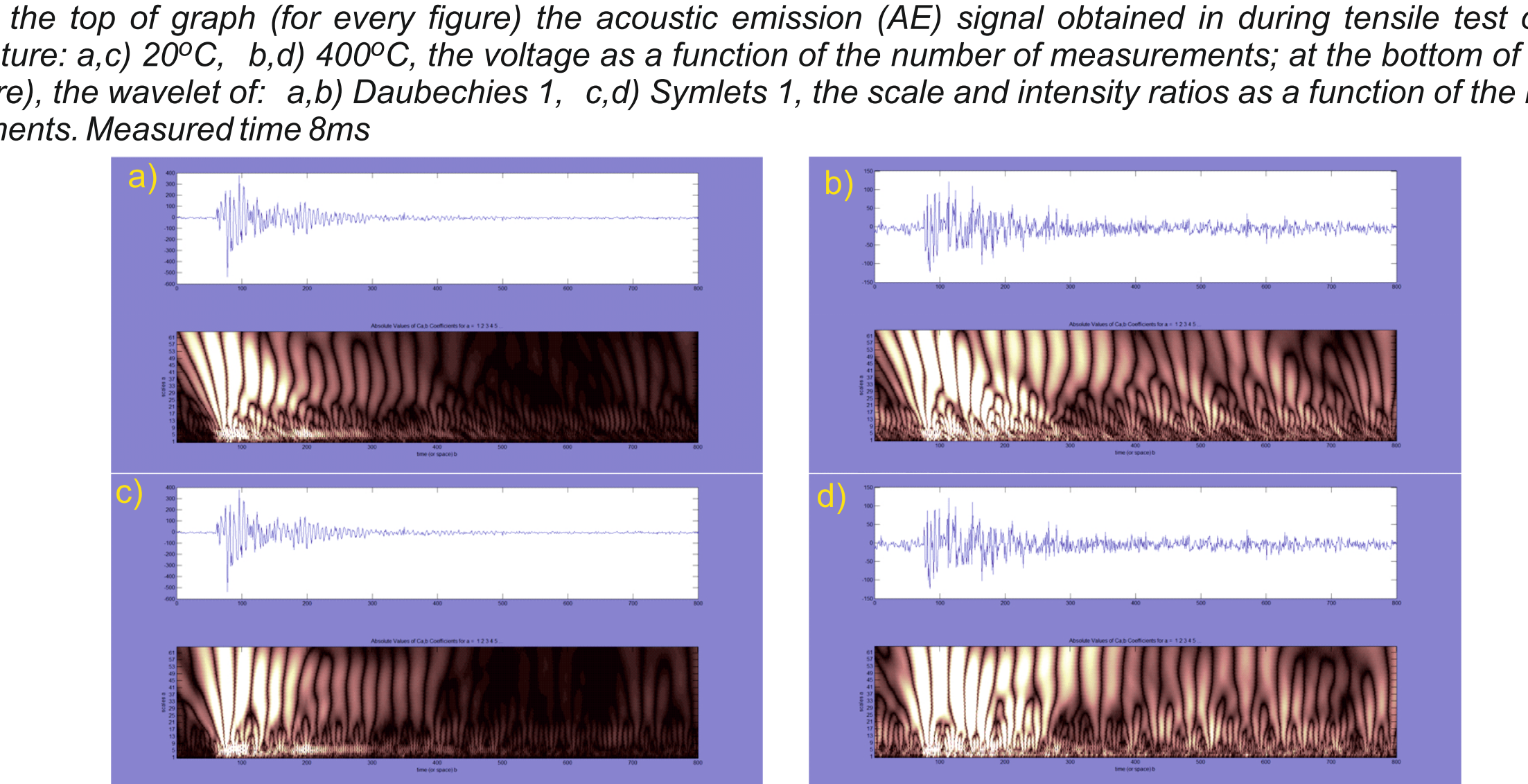
Rys. 14. At the top of graph the acoustic emission (AE) signal obtained in an attempt to break the stylus graphite, the voltage as a function of the number of measurements; at the bottom of graph, the wavelet of Daubechies 7, the scale and intensity ratios as a function of the number of measurements. Measured time 8ms, a) peak 1, b) peak 2



Rys. 15. Krzywa naprzeżenia odkształcenia stali X6CrNiTi18-10 uzyskana w temperaturze a) 20°C, b) 400°C, obszar A - miejsce dla którego przeprowadzono analizę falkową zarejestrowanego sygnału EA  
Fig. 15. Stress strain curve of steel X6CrNiTi18-10 obtained at room temperature of a) 20°C, b) 400°C, the selected site (area A) for which the recorded EA and wavelet analysis of the signal was conducted



Rys. 16. At the top of graph (for every figure) the acoustic emission (AE) signal obtained in during tensile test of steel at a temperature: a-c) 20°C, b-d) 400°C, the voltage as a function of the number of measurements; at the bottom of graph (for every figure), the wavelet of: a, b) Daubechies 1, c, d) Symlets 1, the scale and intensity ratios as a function of the number of measurements. Measured time 8ms



Rys. 17. At the top of graph (for every figure) the acoustic emission (AE) signal obtained in during tensile test of steel at a temperature: a-c) 20°C, b-d) 400°C, the voltage as a function of the number of measurements; at the bottom of graph (for every figure), the wavelet of: a, b) Daubechies 7, c, d) Symlets 7, the scale and intensity ratios as a function of the number of measurements. Measured time 8ms

#### Wnioski Conclusions

- Obrotowy stolik wykorzystywany w trakcie przeprowadzonych badań termograficznych umożliwia na rejestrację emitowanego promieniowania podczerwonego, ze wszystkich powierzchni badanej łopatek przez zadanie odpowiedniej prędkości obrotowej silnika sterowanego z częstotliwością rejestracji kamery.  
1. The rotary table is used during the study thermography enables the recording of infrared radiation emitted from all the area the blades by the task proper engine speed control correlated with cameras recording frequency.
- Obliczenia numeryczne w programie COMSOL pozwalają stwierdzić iż w badanym zakresie temperatur różnice pomiędzy przestrzennym rozkładem temperatur dla łopatek z pokryciem i bez pokrycia wynoszą ok 15-250C. Zauważono znaczące różnice w przestrzennym układzie łopatek bez pokrycia w stosunku do łopatek z pokryciem ochronnym. W przypadku łopatek z pokryciem wartości przesunięcia dla wszystkich punktów są podobne, oraz wartości tych przesunięć w funkcji czasu jak również w funkcji temperatury zmieniają się podobnie. W przypadku łopatek bez pokrycia różne punkty na łopacie wykazują duże tendencje do przemieszczania się w sposób nie jednolity w stosunku do pozostałych.  
2. The numerical calculation in COMSOL shows that the temperature in deep of the turbine stator with the TBC and without TBC are equal about 15-25degC. The displacement of the turbine stator for both cases are different. For stator with TBC for all points the value of shifts are similar, as well as value of these shifts in function of time as well as in function of temperature change similarly. In the cases without TBC the different points show the large tendencies to shifting in way it uniform in relation to remaining.
- W ramach projektu powstało zgłoszenie patentowe: „Sposób bezdotykowej kontroli jednorodności ochronnych powłok powierzchniowych”.  
3. The project created a patent application "Non destructive method of the control the homogenous of the surface coatings".  
Za pomocą kamery termograficznej FLIR SC7000 o rozdzielczości matrycy 640 x 512 pikseli z częstotliwością rejestracji 100 Hz zarejestrowano ślad cieplny wywołany strumieniem gorącego gazu z dyszy skanującej na badanej powierzchni oraz miejsce zawierające ukryty defekt.  
3. The project created a patent application "Non destructive method of the control the homogenous of the surface coatings". Using the FLIR SC7000 thermal camera with a resolution 640 x 512 pixels at a frequency of registration 100 Hz recorded the thermal trace caused by a hot gas stream from the nozzle scanning the surface containing a hidden defect.
- Na podstawie analizy sygnału emisji akustycznej generowanego podczas próby rozciągania stali w temperaturze 20°C i 400°C, przeprowadzonej falkami typu Daubechies i Symlets można wnioskować o różnicach w mechanizmach powodujących destrukcję materiału.  
4. Based on the analysis of acoustic emission signals generated during tensile steel at 20°C and 400°C, after wavelets a Daubechies and Symlets can be inferred about the differences in the mechanisms causing the destruction of the material. The proposed method EA signal analysis can be used in tests of composite materials (barrier coatings TBC), in which the degradation of the structure is different, in the matrix and reinforcing phase (in the core and the coating).

#### Wskaźniki realizacji celów projektu Indicators of the project

W ramach projektu powstało zgłoszenie patentowe: „Sposób bezdotykowej kontroli jednorodności ochronnych powłok powierzchniowych”  
The project created a patent application "Non destructive method of the control the homogenous of the surface coatings".