

Nowoczesne pokrycia barierowe na krytyczne części silnika

Politechnika Rzeszowska, Politechnika Śląska, Politechnika Warszawska, Politechnika Lubelska

Wyniki badań

Cel badania obciążeń cieplnych łopatek turbin

Łopatki turbiny spalinowej poddane są wysokim obciążeniom mechanicznym wynikającym głównie z działania sił odśrodkowych oraz sił gazodynamicznych. Równocześnie na skutek niejednorodności pola temperatur w łopatkach turbin pojawiają się naprężenia termiczne. W miarę wzrostu temperatury obniżają się własności wytrzymałościowe materiału, z którego są wykonane łopatki. Przekroczenie dopuszczalnych wartości temperatur lub naprężeń może doprowadzić do przedwczesnego zużycia lub nawet natychmiastowego uszkodzenia silnika.

Ekonomiczne wykorzystanie turbin spalinowych w silnikach lotniczych ograniczone jest stosunkowo niskimi temperaturami spalin przed układem łopatkowym. Sprawność oraz inne osiągi silnika turbiny zależą bardzo istotnie od stosunku najwyższej do najniższej temperatury czynnika roboczego. Najniższa temperatura czynnika roboczego ograniczona jest temperaturą powietrza atmosferycznego. Najwyższa temperatura spalin przed układem łopatkowym turbiny zależy od mechanicznych własności materiałów konstrukcyjnych przy wysokich temperaturach i od zastosowanego sposobu chłodzenia.

W celu zabezpieczenia materiału konstrukcyjnego łopatki turbiny przed nadmiernym wzrostem temperatury stosowane są pokrycia ceramiczne (TBC).

Numeryczna metoda wyznaczania rozkładu temperatur w łopatkach turbin

Rozwiązanie problemu odbyło się w dwóch krokach przy użyciu metody MES:

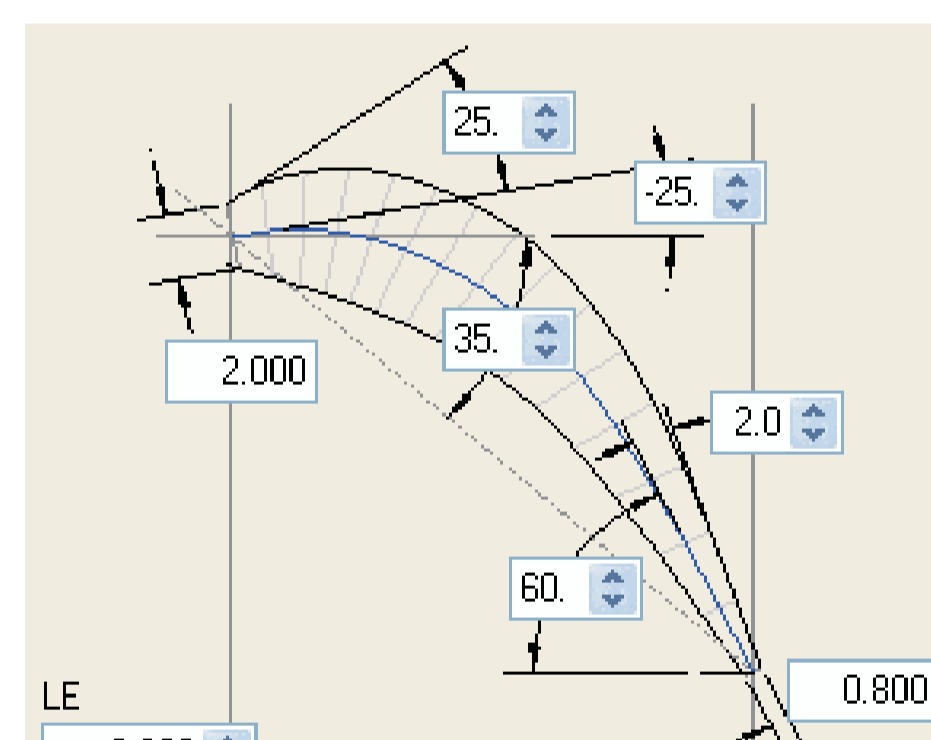
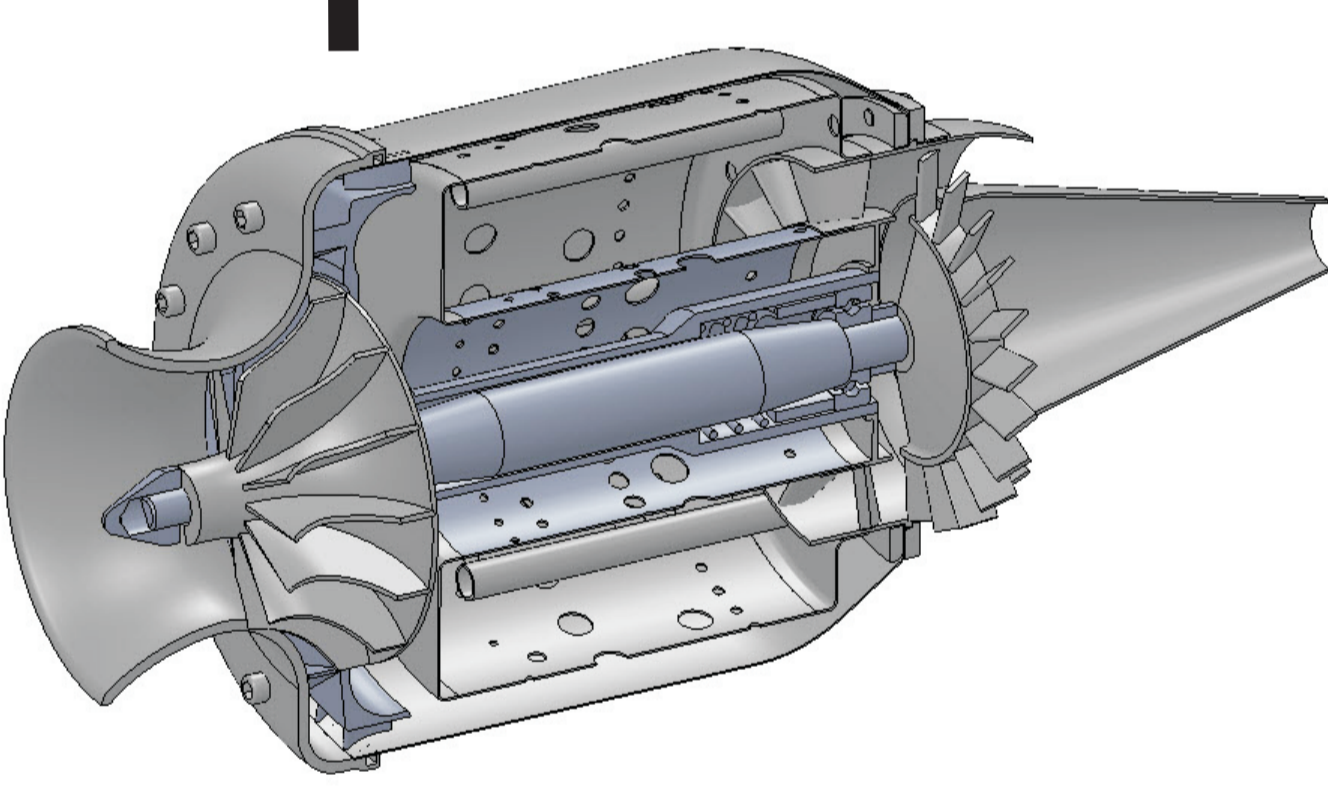
- zagadnienie przepływu gazów spalinowych oraz określenie rozkładów temperatur na powierzchni bocznej łopatki zostało wykonane przy pomocy programu ANSYS Fluent
- rozkład naprężeń oraz analiza procesu zniszczenia powierzchni łopatki została wykonana przy użyciu programu Abaqus

Etap I - uzyskanie geometrii

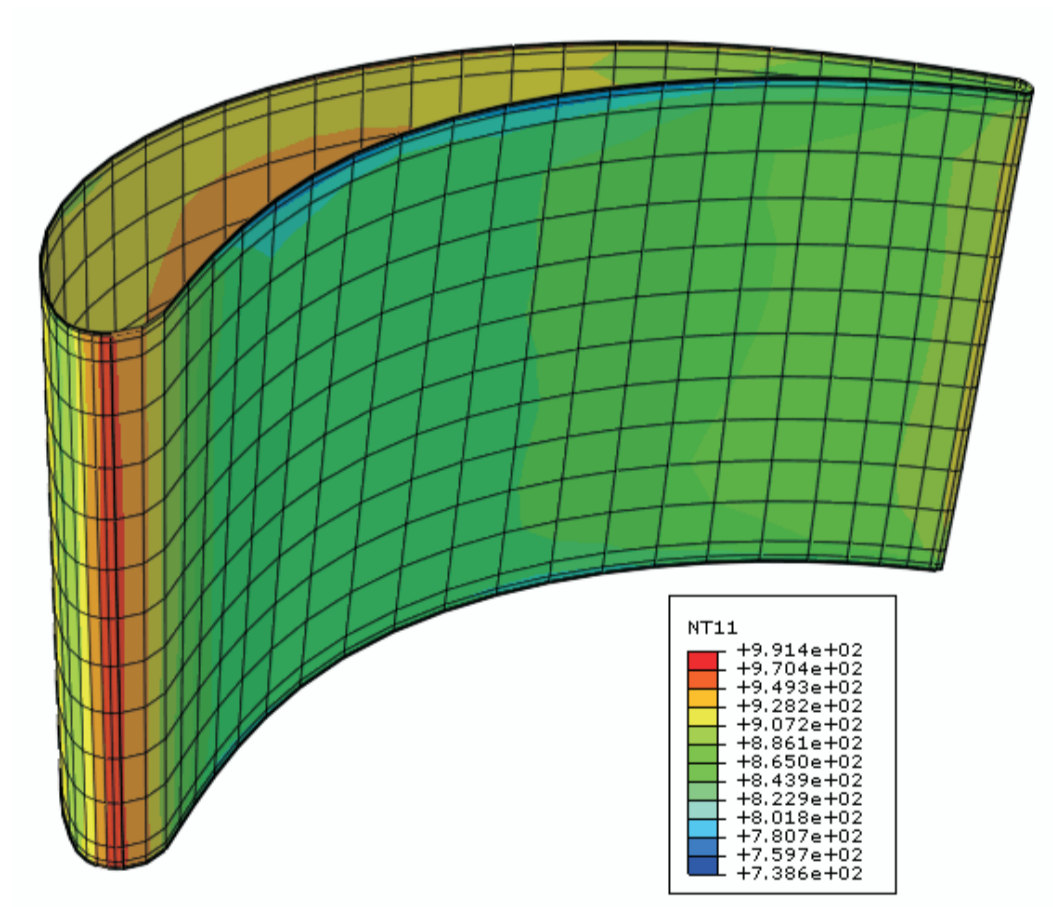
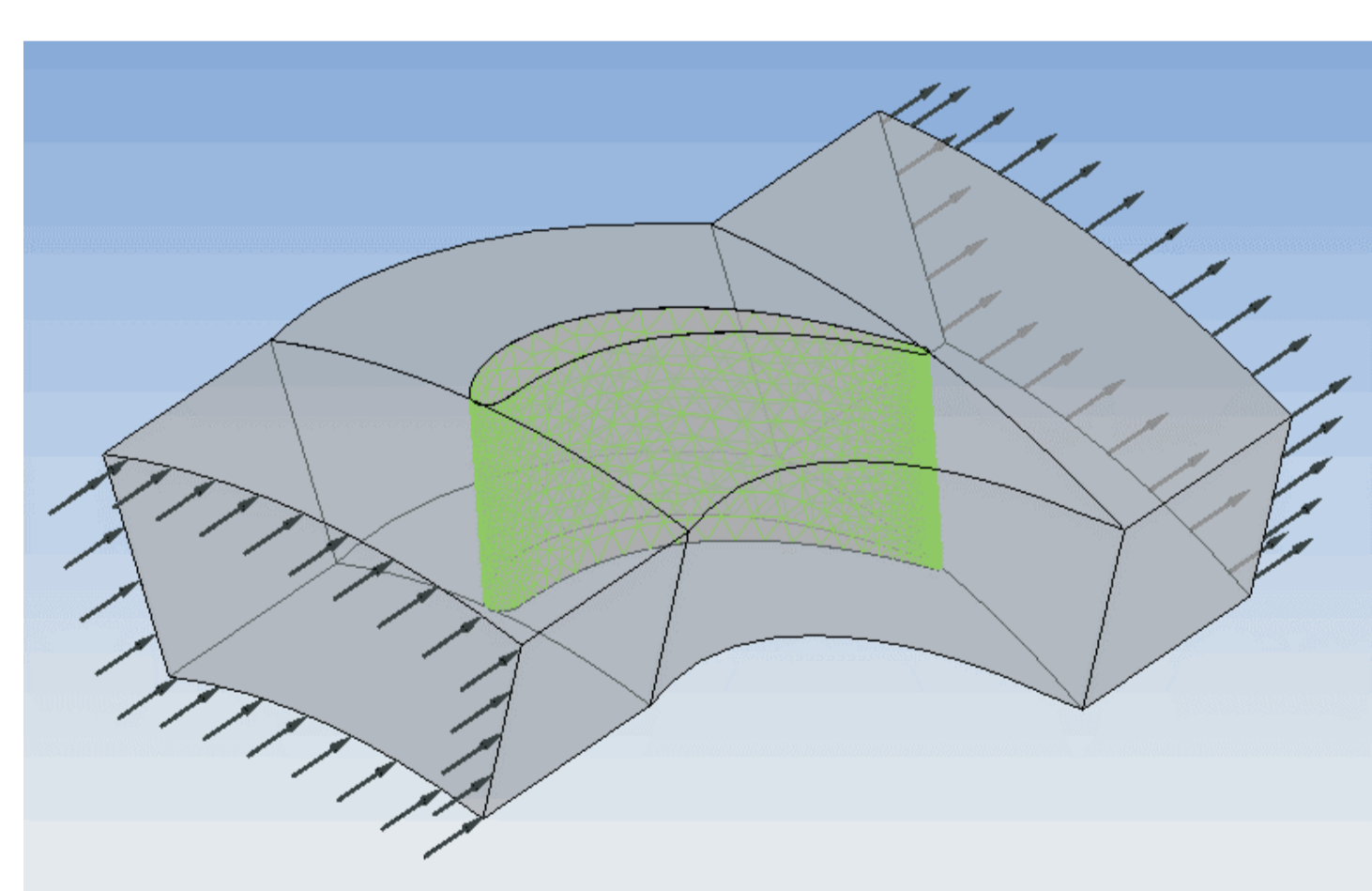
Podstawowe równania stopnia turbiny

Tworzą je związki między parametrami spalin i parametrami geometrycznymi kanału przepływowego, ustalane na podstawie zależności znanych z termodynamiki i dynamiki gazów. Podstawowymi równaniami stopnia są:

- równanie ciągłości strumienia,
- równanie energetyczne przepływu,
- uogólnione równanie Bernoulli'ego,
- równanie Eulera dla maszyn wirnikowych



Etap II — symulacja CFD oraz uzyskanie rozkładu temperatury na



Wnioski

Badanie wytrzymałości łopatek turbin jest zagadnieniem dość złożonym. Na wytrzymałość, prócz obciążeń termicznych analizowanych w pracy, mają ponadto wpływ:

- obciążenia od przepływu czynnika (wywołane statycznym i dynamicznym działaniem przepływającego czynnika na profilową część łopatki)
 - masowe (siły odśrodkowe mas łopatek, siły wywołane drganiami sprężystymi łopatek).
- Uzyskane wyniki prowadzą do następujących wniosków:
- Zastosowanie TBC prowadzi do istotnego zmniejszenia wartości maksymalnej temperatury (10%),
 - TBC znacząco chroni łopatkę przed procesem termicznego uszkodzenia,
 - TBC nie tylko zmniejsza przepływ ciepła, lecz także chroni jej powierzchnię przed utlenianiem i korozją,
 - TBC daje nie tylko skuteczną ochronę przed wysoką temperaturą gazów spalinowych, lecz także przed nadmiernymi naprężeniami.

Jednak w celu lepszego zbliżenia się do rzeczywistości należy w dalszym toku badań uwzględnić także obciążenia powyżej wspomniane.

Analityczna metoda wyznaczania rozkładu temperatur w łopatkach turbin

Pole temperatur w łopatkach wirnika turbiny zależy bezpośrednio od temperatury spalin T_g

gdzie:

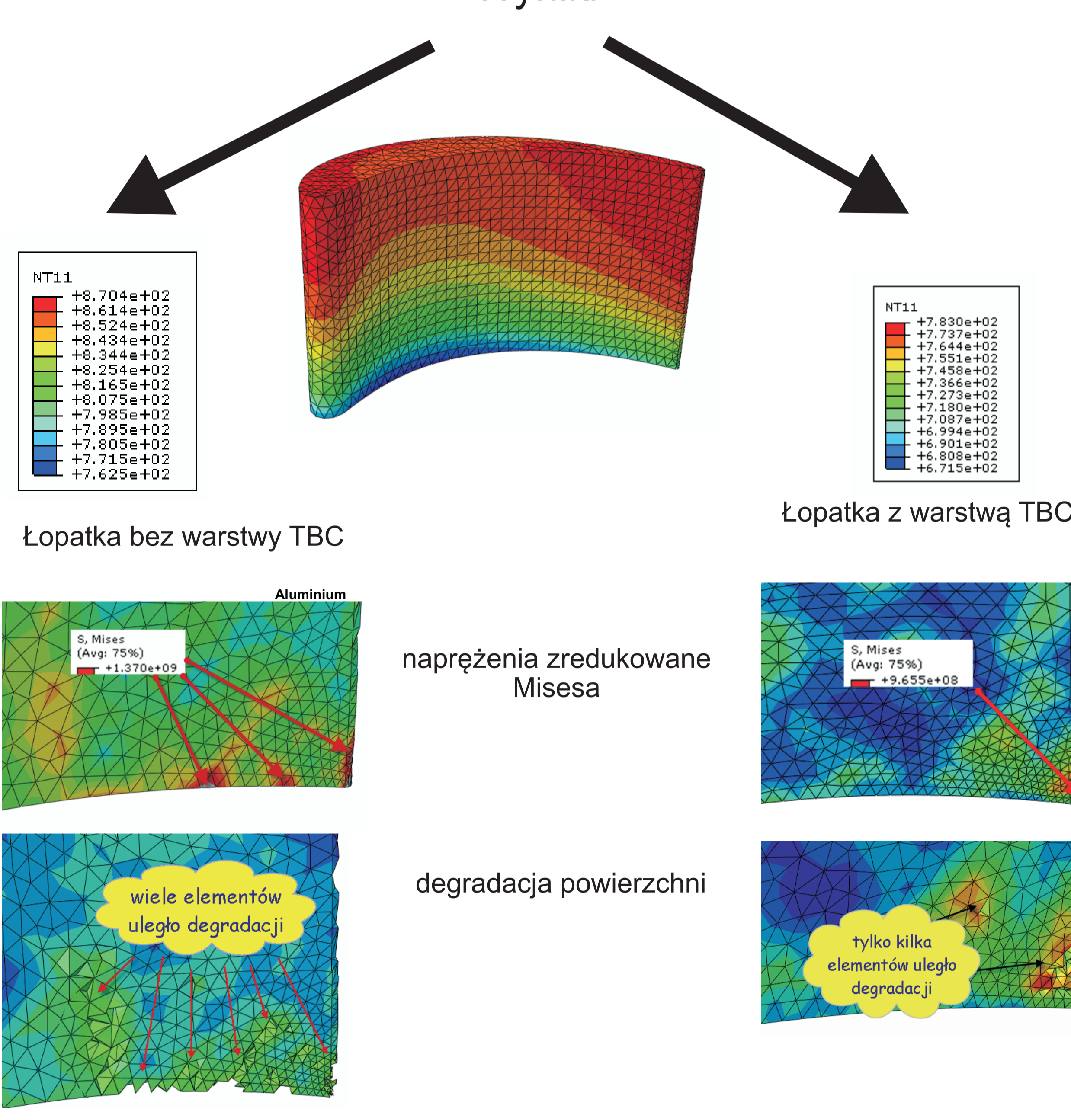
$$T_g = T_0 - \frac{c_1^2 - r_1 w_1^2}{2c_{pg}}$$

T_0 – temperatura spiętrzenia spalin przed łopatkami kierownicy [K],
 c_1 – prędkość bezwzględna wypływu spalin z dyszy kierownicy [m/s],
 w_1 – prędkość względna napływu spalin na łopatkę wirnika [m/s],
 $r_1 = 0,85 - 0,95$ – współczynnik odzyskania temperatury,
 c_{pg} – ciepło właściwe spalin przy stałym ciśnieniu [J/kgK].

Ze względu na skomplikowane kształty i warunki brzegowe wymiany ciepła, określenie pola temperatur w łopatkach wirnika metodą analityczną jest dość trudnym i czasochłonnym problemem. Ciepło dopływa do pióra łopatki od spalin a odprowadzane jest przez styk w zamku łopatki do tarczy wirnika. Współczynnik przejmowania ciepła zmienia się wzdłuż obwodu i wzdłuż wysokości pióra łopatki

Etap III — symulacja CMS oraz otrzymane wyniki

Wyniki



Łopatka bez warstwy TBC

Łopatka z warstwą TBC

naprężenia zredukowane Misesa

degradacja powierzchni

Wnioski

- Głównym składnikiem mikrostruktury warstwy są kryształy fazy międzymetalicznej NiAl;
- Twardość warstwy aluminiowej wynosi ok. 400-700 HV_{0,5} co jest od 100 do 300 HV_{0,5} większa w porównaniu do podłoża. Wzrost twardości warstwy aluminiowej jest spowodowany obecnością węglików oraz faz międzymetalicznych pierwiastków: chromu, molibdenu i kobaltu;
- Wzrost ciśnienia gazu reakcyjnego powoduje zwiększenie głębokości warstwy aluminiowej oraz zmniejszenie chropowatości powierzchni. Zmiana ciśnienia od 50 do 150 hPa powoduje zwiększenie głębokości warstwy aluminiowej o 10 μm. Następnym wzrost ciśnienia gazu od 150 do 500 hPa nie powoduje istotnej zmiany głębokości warstwy aluminiowej;
- Wydłużenie czasu aluminiowania powoduje wzrost głębokości warstwy aluminiowej. Wzrost warstwy dyfuzyjnej ma charakter paraboliczny. Następuje również zwiększenie zawartości aluminium. Spowodowane jest to wzrostem efektywności dyfuzji aluminium z gazu reakcyjnego oraz z materiału podłoża.

Wskaźniki realizacji celów projektu

Konferencje

- M. Yaworska, J. Sieniawski: *Właściwości użytkowe warstwy aluminiowej wytworzonej w procesie cvd na nadstopie niklu inconel 713 LC*, 19 XXXVI Szkoła Inżynierii Materiałowej Kraków-Krynica 29 IX – 2 X 2009

Publikacje

- M. Yaworska, J. Sieniawski: *Functional properties of aluminate layer deposited on inconel 713 lc ni-based superalloy in the CVD process*, Archives of Metallurgy and Materials;

Prace mgr, dr, hab..

Prace magisterskie

- Adrian Cieśla; „Wpływ składu chemicznego nadstopów niklu na głębokość warstwy wytworzonej metodą CVD” Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Politechnika Rzeszowska, Promotor dr inż. Maciej Motyka

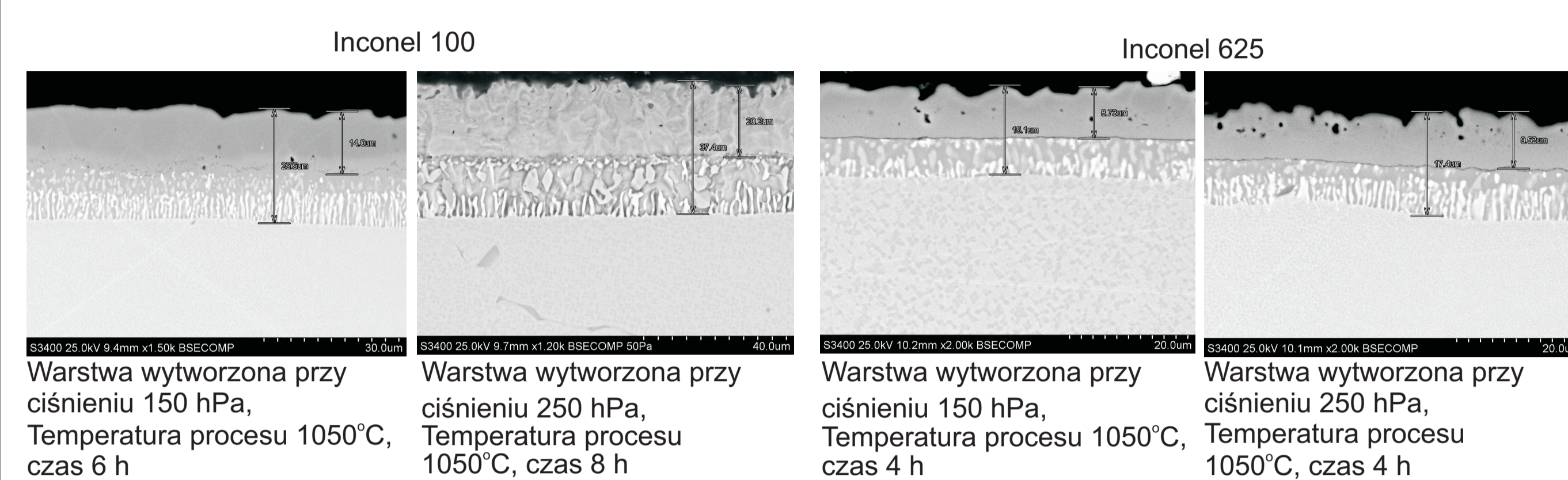
Wyniki badań

Opracowanie podstaw technologii oraz parametrów technologii wytwarzania nowych modyfikowanych powłok aluminiowych metodą CVD w tym międzywarstw stanowiących alternatywę dla międzywarstw typu MeCrAlY pod powłokowe bariery cieplne

W ramach prowadzonych badań analizowano wpływ warunków procesu CVD na budowę i właściwości otrzymanych warstw. Przedstawiono zasady i efekty modyfikowania powłok aluminiowych w celu poprawy ich właściwości eksploatacyjnych. Opracowano metodykę i wykonano badania mikrostruktury, składu chemicznego i fazowego. Wykonano badania grubości warstwy uzyskanej dla różnych warunków procesu aluminiowania. Przeprowadzono pomiary twardości warstwy aluminiowej, badania topografii powierzchni po aluminiowaniu.

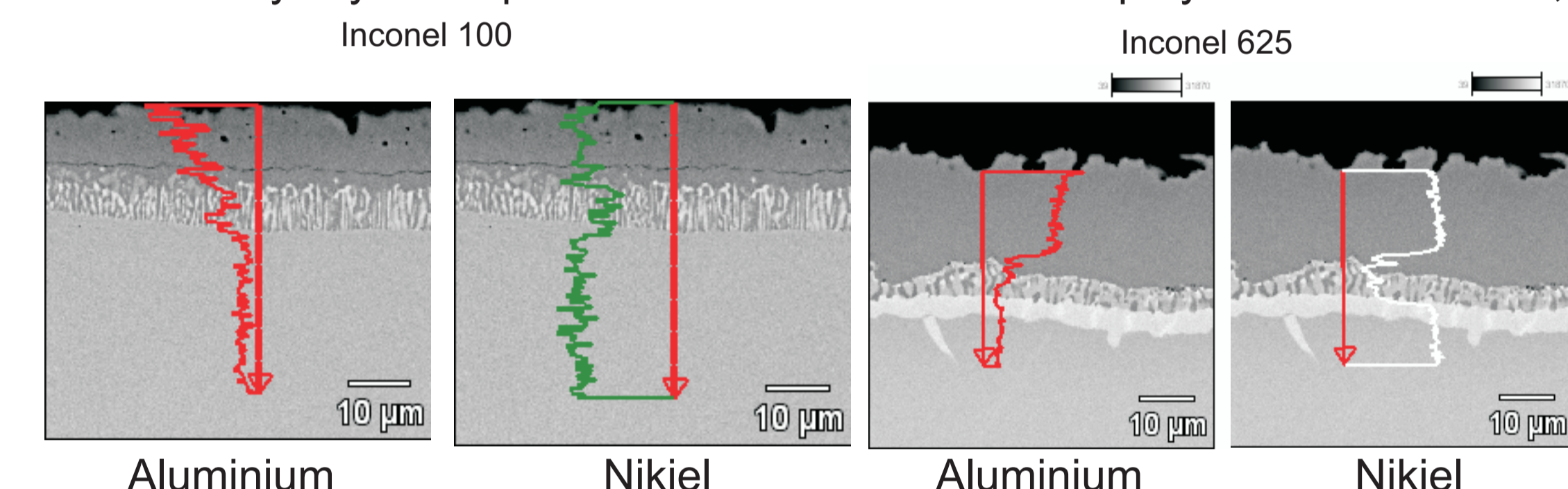
Przygotowano linię technologiczną dla wytwarzania modyfikowanych powłok aluminiowych zawierającą generator zewnętrzny dla wytwarzania MeCrX. Planowane jest wytwarzanie warstw aluminiowych modyfikowanych Hf i Zr jako międzywarstw dla powłokowych barier

Mikrostruktura warstwy aluminiowej przy różnych parametrach procesu CVD

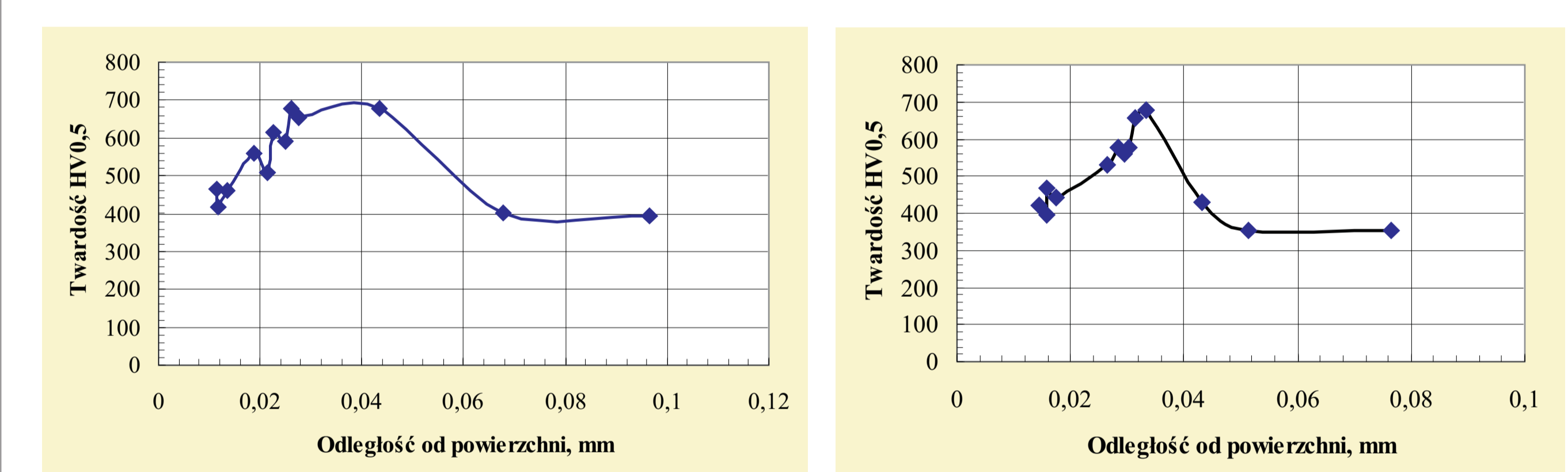


Skład chemiczny warstwy aluminiowej

Proces niskoaktywny w temperaturze 1050 °C w czasie 8h przy ciśnieniu 150hPa,



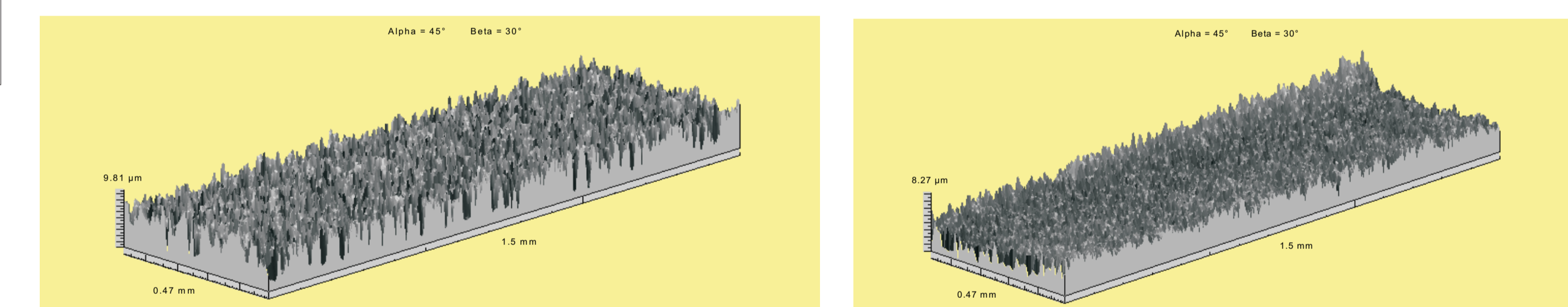
Twardość warstwy aluminiowej wytworzonej na nadstopie niklu Inconel 713 LC



Proces wysokoaktywny prowadzony w temperaturze 1050 °C w czasie 8h przy ciśnieniu 150 hPa

Proces niskoaktywny prowadzony w temperaturze 1050 °C w czasie 4h przy ciśnieniu 150 hPa

Badania topografii powierzchni po procesie aluminiowania



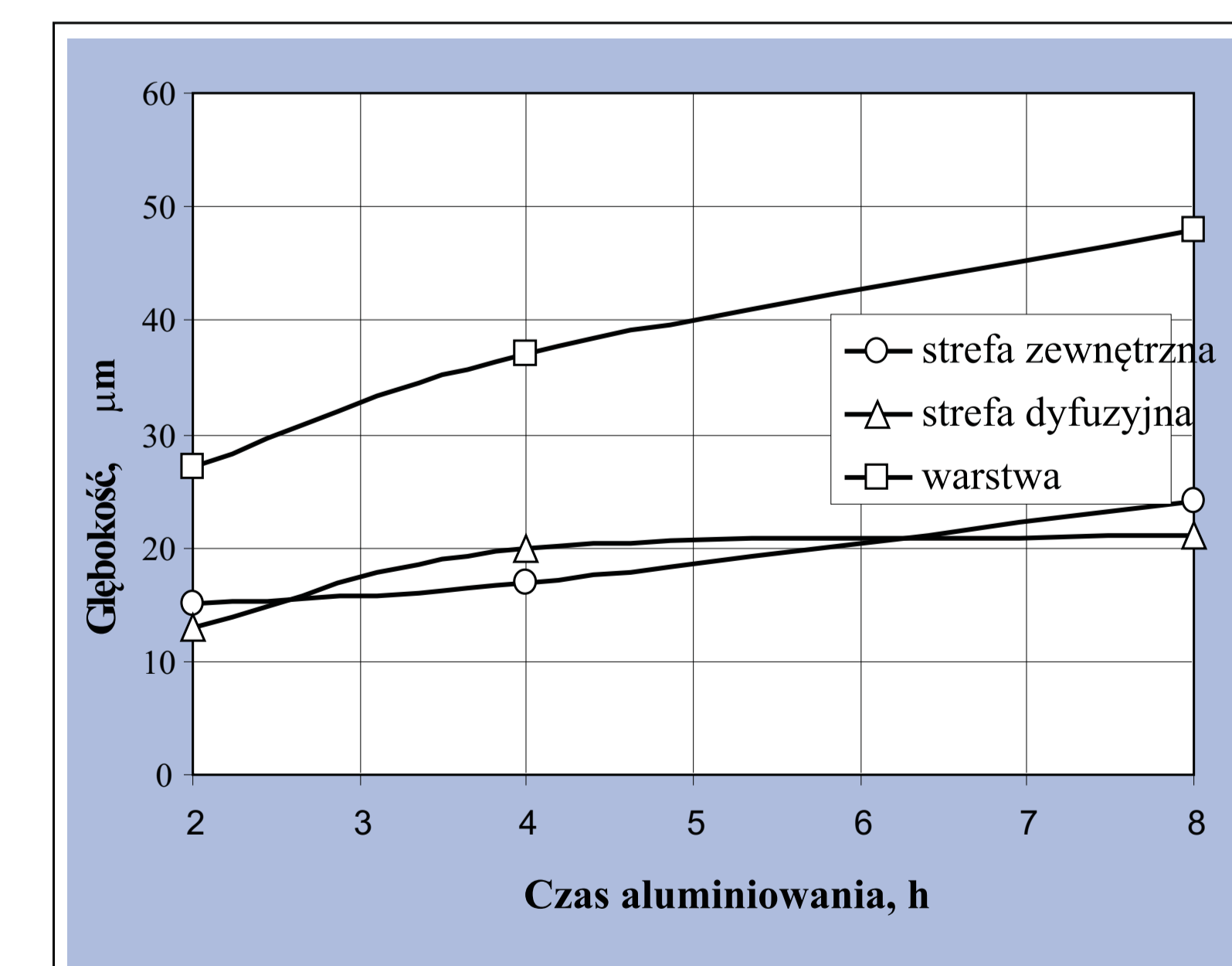
Warunki procesu-150 hPa, 1050 °C, 6 h

Parametry topografii powierzchni:
 $S_a = 1,53 \mu m$
 $S_q = 1,82 \mu m$
 $S_p = 5,12 \mu m$
 $S_v = 4,59 \mu m$
 $S_t = 9,81 \mu m$
 $S_{sk} = -0,289$
 $S_{ku} = 2,1$
 $S_z = 9,1 \mu m$

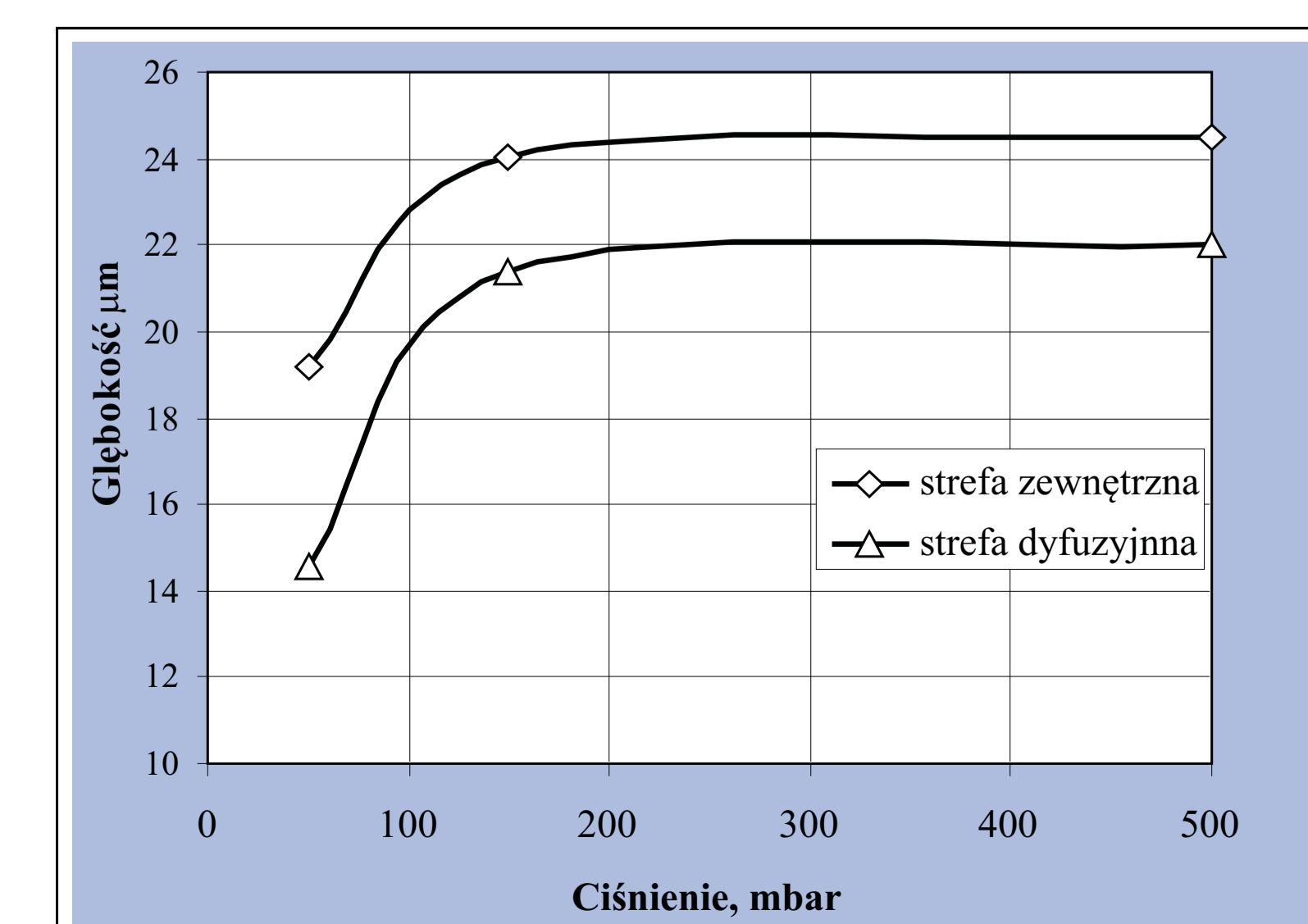
Warunki procesu-250 hPa, 1050 °C, 6 h

Parametry topografii powierzchni:
 $S_a = 0,63 \mu m$
 $S_q = 0,822 \mu m$
 $S_p = 4,87 \mu m$
 $S_v = 3,4 \mu m$
 $S_t = 8,27 \mu m$
 $S_{sk} = 0,583$
 $S_{ku} = 4,4$
 $S_z = 6,36 \mu m$

Oddziaływanie parametrów procesu CVD na głębokość wytworzonej warstwy



Wpływ czasu aluminiowania na głębokość warstwy aluminiowej wytworzonej w temperaturze 1050 °C i ciśnieniu 150 mb na podłożu z nadstopu Inconel 713 LC



Wpływ ciśnienia gazu na głębokość warstwy aluminiowej wytworzonej w temperaturze 1050 °C i w czasie 8h na podłożu z nadstopu Inconel 713 LC