



Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym

Segment nr 10

Nowoczesne pokrycia barierowe na krytyczne elementy silnika lotniczego

dr hab. inż. Lucjan Swadźba, dr hab. inż. Ryszard Filip prof. w Pol. Rz.

Politechnika Rzeszowska,
Politechnika Śląska, Politechnika Warszawska, Politechnika Lubelska

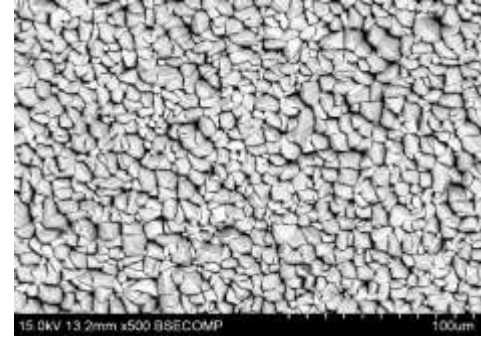
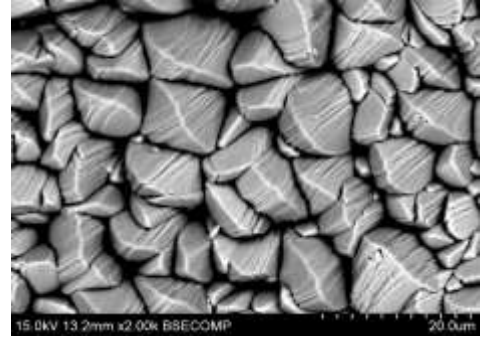
Rzeszów, Grudzień 2009

POWŁOKOWE BARIERY CIEPLNE TBC's

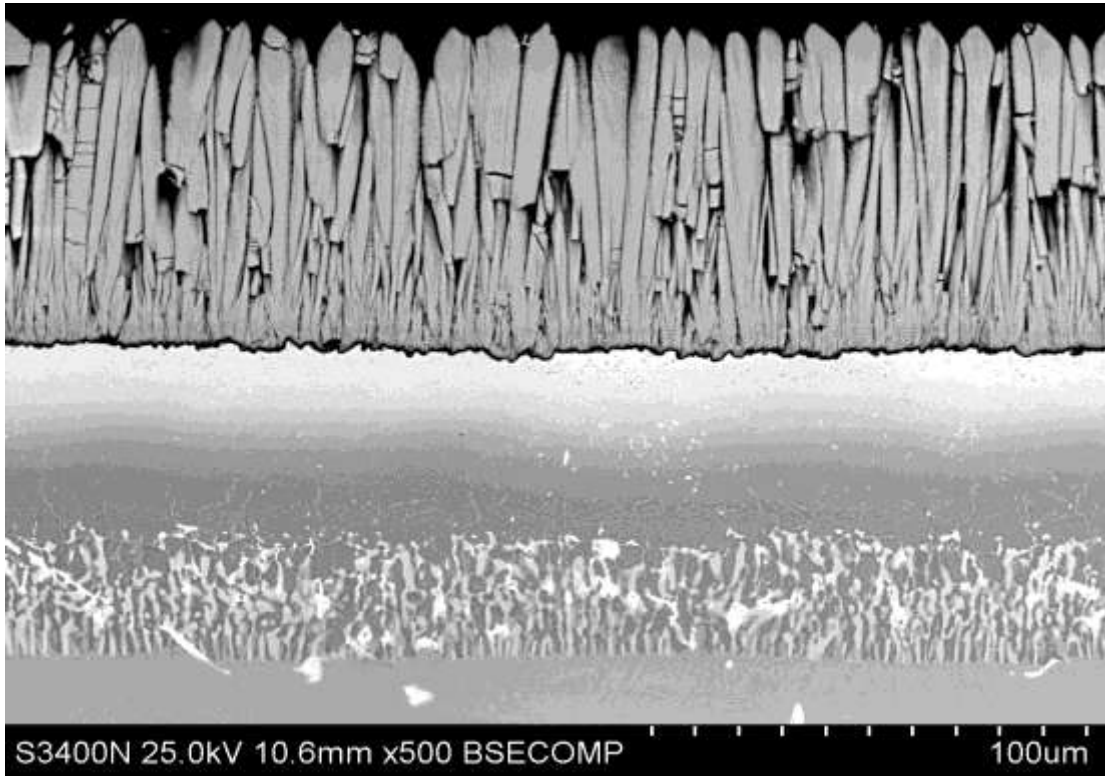
TBCs jest skrótem pojęcia Thermal Barrier Coatings oznacza powłoki, które dzięki niskiej przewodności cieplnej stanowią barierę oddzielającą powierzchnię elementów od strumienia gorących gazów.

Materiał	Pokrycie	Funkcja
$ZrO_2 + (6-8\%)Y_2O_3$	TBC	Izolacja cieplna
Al_2O_3	TGO	Warstwa tlenków ochronnych
MCrAlY (20%Cr-12%Al) lub aluminidki	Międzywarstwa	Ochrona przed utlenianiem Poprawa przyczepności
Nafdstop na bazie Ni (8%Cr-5%Al)	Podłoże	Przenoszenie obciążeń cieplno mechanicznych

BARIERY CIEPLNE TBC's EB-PVD



POWIERZCHNIA

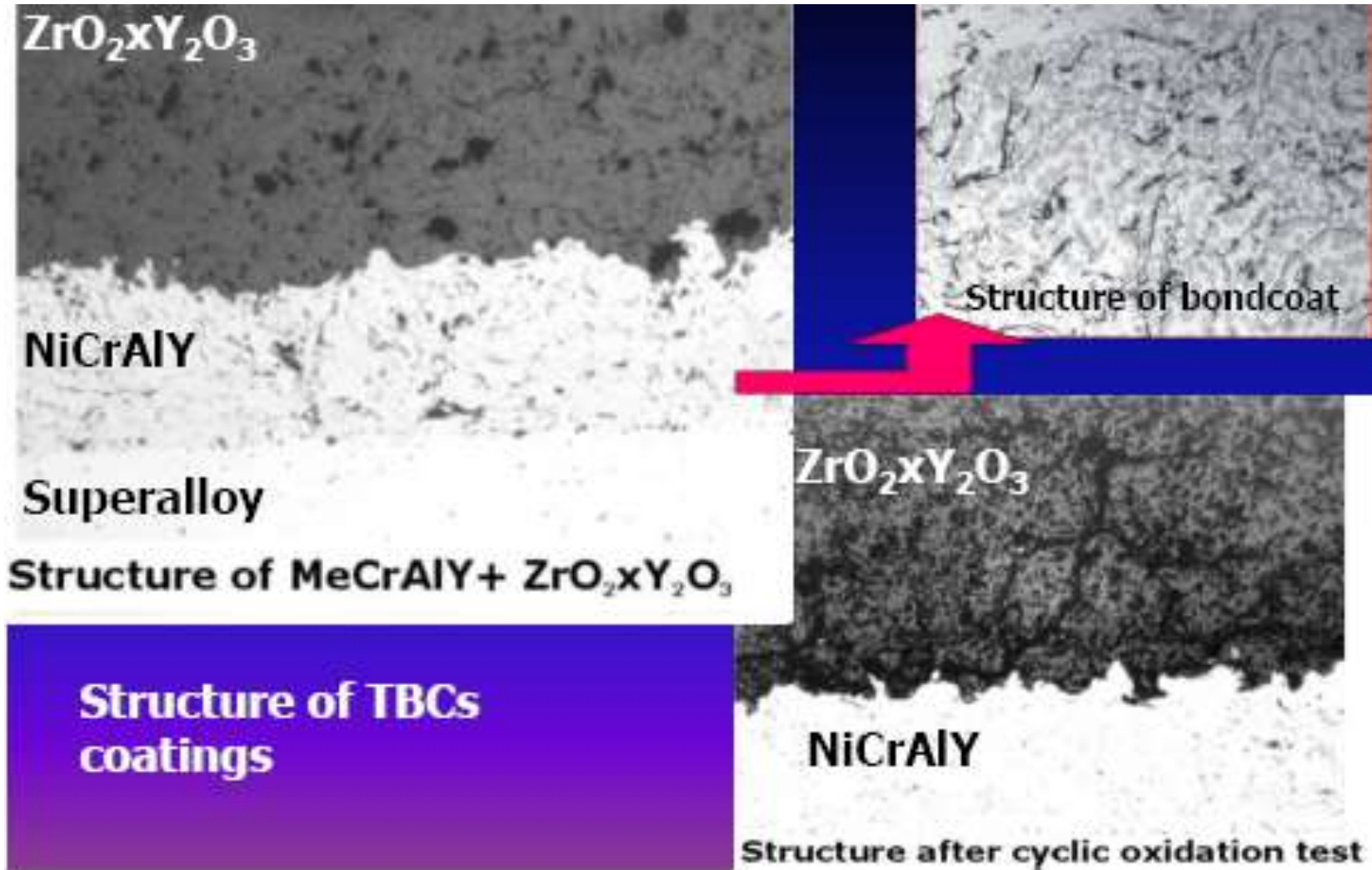


$ZrO_2*Y_2O_3$
(EB-PVD)

Pt-modified
aluminide
bond coat

Base
IN 738

BARIERY CIEPLNE TBC's APS





Podzadanie 1. POLITECHNIKA LUBELSKA

Modelowanie fizyczne powłokowej bariery cieplnej z uwzględnieniem właściwości materiału i warunków pracy.

Cel :

- Uzyskanie modelu fizycznego opisującego zachowanie się powłokowej bariery cieplnej w zależności od rodzaju materiału oraz warunków jego eksploatacji

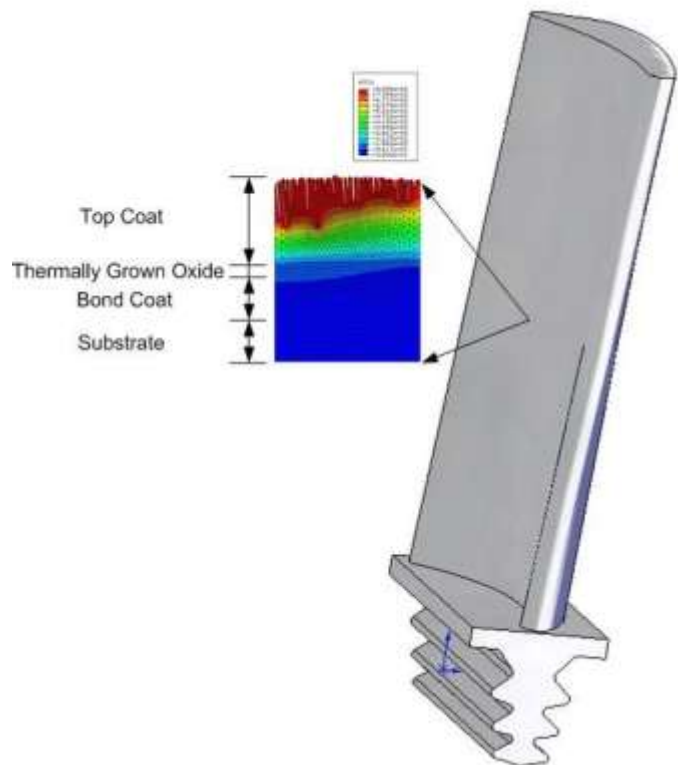
Cel naukowy:

- Analiza procesów degradacji powłokowych barier cieplnych w warunkach eksploatacji przy uwzględnieniu czynników materiałowych i zewnętrznych

Podzadanie 1. POLITECHNIKA LUBELSKA

Modelowanie fizyczne powłokowej bariery cieplnej z uwzględnieniem właściwości materiału i warunków pracy.

Cel stosowania pokryć na krytyczne części silnika

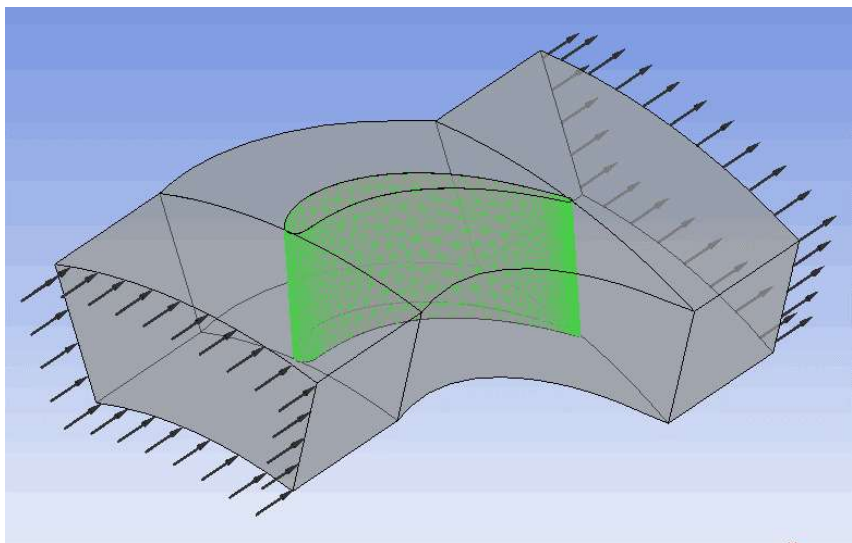


- wzrost sprawności silnika,
- spadek zużycia paliwa,
- zabezpieczenie materiału łopatki przed agresywnym działaniem gazów spalinowych,
- spadek emitowanych zanieczyszczeń (NO_x , CO_2),
- większa odporność na szoki termiczne.

Podzadanie 1. POLITECHNIKA LUBELSKA

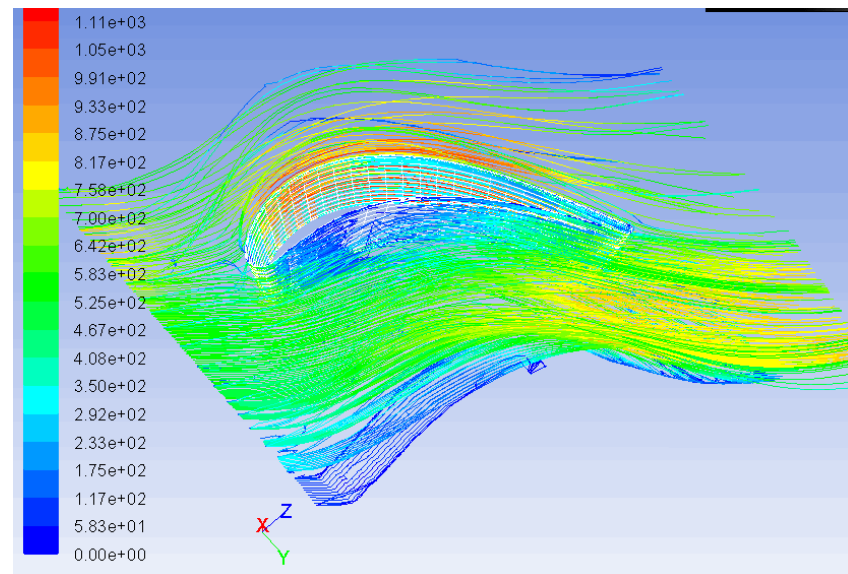
Modelowanie fizyczne powłokowej bariery cieplnej z uwzględnieniem właściwości materiału i warunków pracy.

Zastosowanie programu do symulacji przepływów



Wynikiem było otrzymanie rozkładu temperatury, zmian ciśnienia i prędkości przepływu.

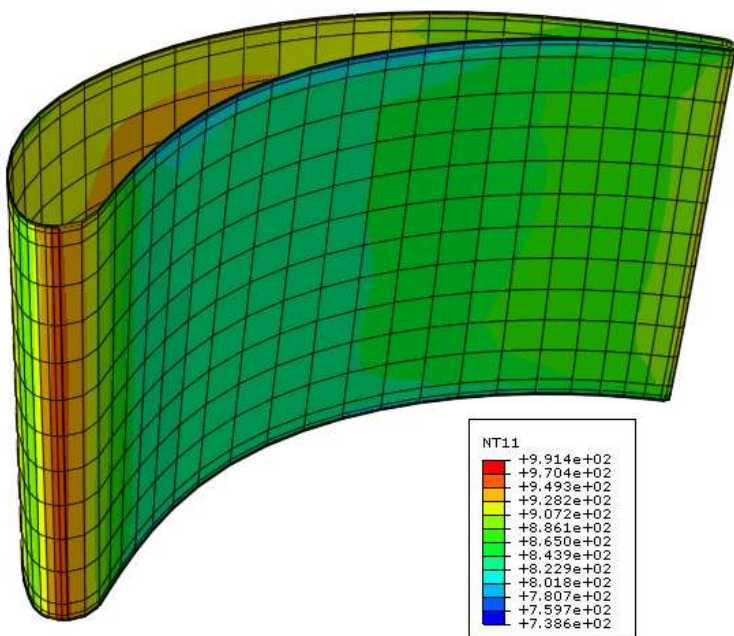
W programie Fluent symulowano przepływ ustalony gazów spalinowych oddziałujących na powierzchnię łopatki.



Podzadanie 1. POLITECHNIKA LUBELSKA

Modelowanie fizyczne powłokowej bariery cieplnej z uwzględnieniem właściwości materiału i warunków pracy.

Rozkład temperatury na powierzchni łopatk



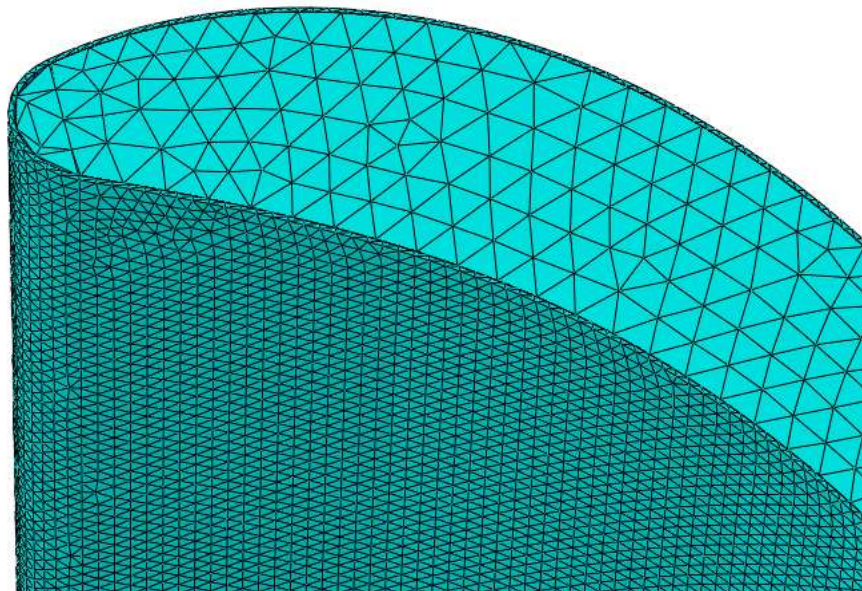
Najistotniejsze wyniki uzyskane z programu przepływowego dotyczyły informacji na temat rozkładu temperatury na powierzchni łopatk. Uzyskane wartości były następnie importowane do programu Abaqus.



Podzadanie 1. POLITECHNIKA LUBELSKA

Modelowanie fizyczne powłokowej bariery cieplnej z uwzględnieniem właściwości materiału i warunków pracy.

Modelowanie cienkich warstw ceramicznych



Oddzielnym etapem badań jest wykonanie geometrii łopatki wraz z cienką warstwą ceramiczną. Całość również importowana była do programu Abaqus. Temperatury z programu przepływowego traktowane były jako obciążenie cieplne powierzchni bocznej zaimportowanej geometrii.

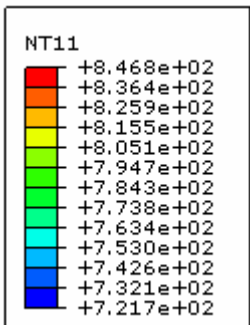
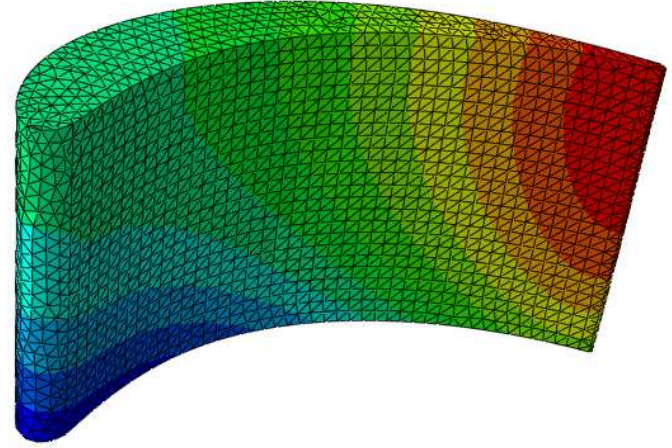
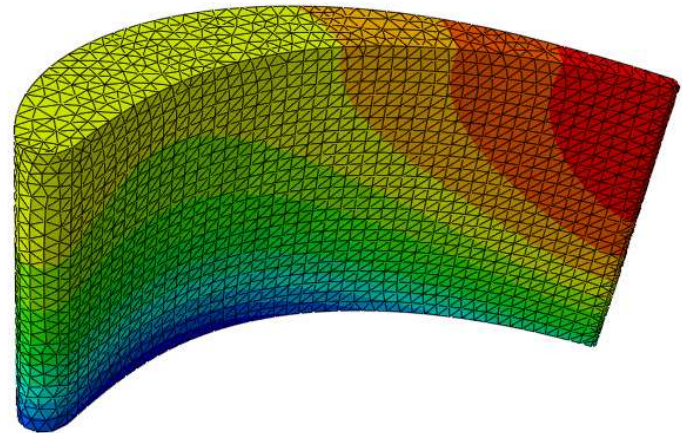
Podzadanie 1. POLITECHNIKA LUBELSKA

Modelowanie fizyczne powłokowej bariery cieplnej z uwzględnieniem właściwości materiału i warunków pracy.

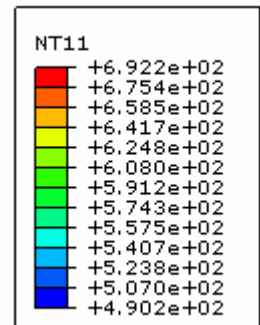
Wyniki badań numerycznych

Łopátka bez TBC

Łopátka z TBC



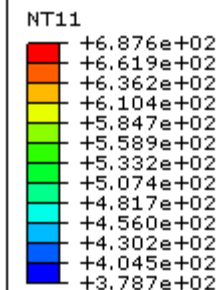
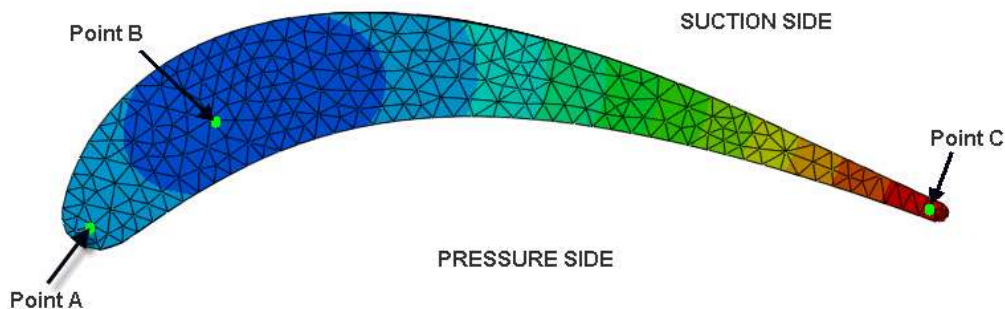
Rozkłady temperatur w łopatkach po 200 s od zapoczątkowania nagrzewania. Uwzględnione zostało odprowadzanie ciepła do pióra łopátki przez przewodzenie oraz wymiana ciepła poprzez konwekcje na bocznej powierzchni



Podzadanie 1. POLITECHNIKA LUBELSKA

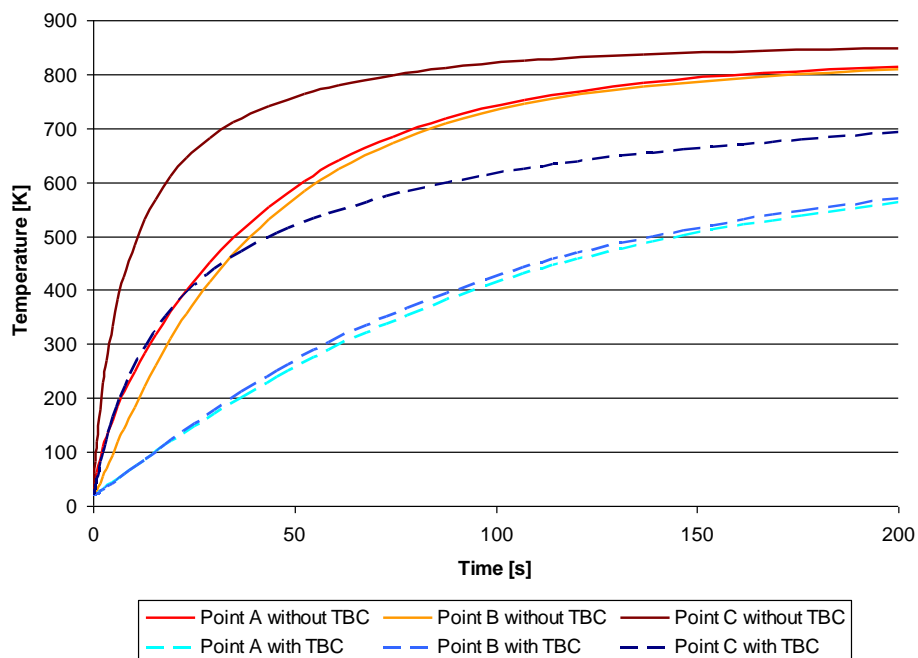
Modelowanie fizyczne powłokowej bariery cieplnej z uwzględnieniem właściwości materiału i warunków pracy.

Wyniki badań numerycznych



Przeprowadzono porównanie dla łopaty z TBC oraz bez pokrycia ochronnego

Rozważano ponadto prędkości narastania temperatur w trzech punktach przekroju poprzecznego łopaty





Podzadanie 1. POLITECHNIKA LUBELSKA

Modelowanie fizyczne powłokowej bariery cieplnej z uwzględnieniem właściwości materiału i warunków pracy.

WNIOSKI

Badanie trwałości łopatek turbin jest zagadnieniem złożonym. Na trwałość, prócz obciążeń termicznych analizowanych w pracy, mają ponadto wpływ obciążenia od przepływu czynnika (wywołane statycznym i dynamicznym działaniem przepływającego czynnika na profilową część łopatki) oraz masowe (siły odśrodkowe mas łopatek, siły wywołane drganiem sprężystymi łopatek).

Dzięki zastosowaniu 0,5 mm warstwy ochronnej odnotowano spadek temperatury w przekroju łopatki o około 18%. Skutkuje to tym, że temperatura spalin przed łopatką może ulec zwiększeniu, co przyczyni się do wzrostu sprawności silnika.

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



Podzadanie 2. POLITECHNIKA ŚLĄSKA

Opracowanie podstaw technologii wytwarzania modyfikowanych powłok aluminiowych oraz krzemkowych metodami gazowymi w tym, stanowiących międzywarstwy pod powłoki TBC otrzymywane metodą EB-PVD na łopatkach kierujących turbiny.

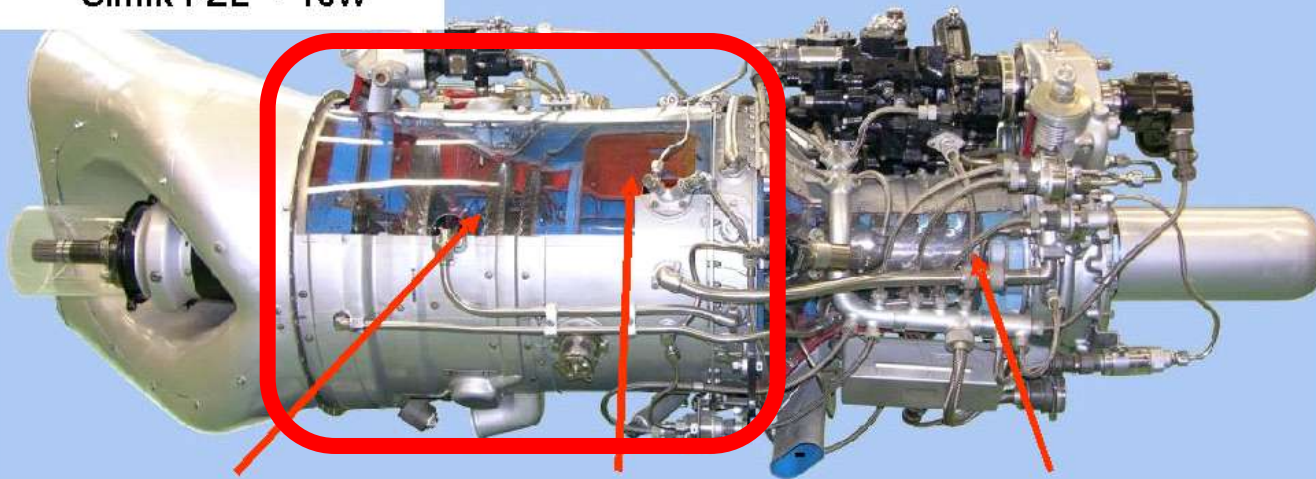
Cel :

- zwiększenie trwałości łopatek kierujących silnika lotniczego (AKTS),
- opracowanie podstaw technologii wytwarzania powłok ochronnych,
- odpornych na wysokotemperaturową korozję oraz powłokowych,
- barier ciepłych (TBC) na łopatkach kierujących silnika lotniczego, oraz innych elementach silnika.

Cel naukowy:

- wyjaśnienie mechanizmów oddziaływania pierwiastków szlachetnych na strukturę skład fazowy wybrane właściwości powłok,
- analiza zjawisk fizycznych i chemicznych w procesach otrzymywania powłok na materiałach żarowytrzymałych,
- próba wyjaśnienia mechanizmów oddziaływania międzywarstwy z ceramiczną barierą cieplną TBC w wysokiej temperaturze.

Silnik PZL - 10W



**Łopatk kierujące
i wirujące – powłoki
aluminidkowe**

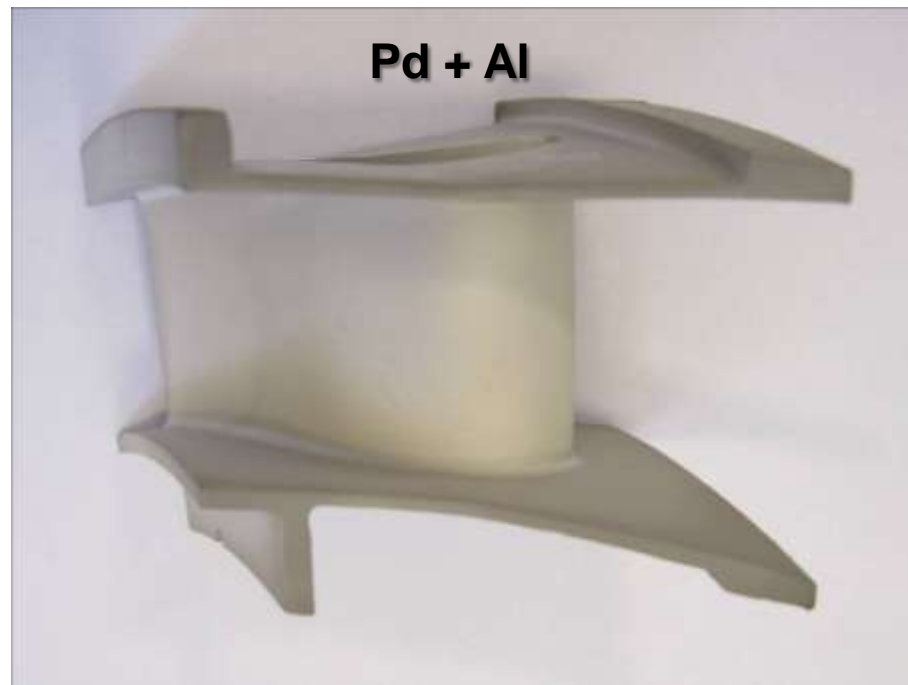
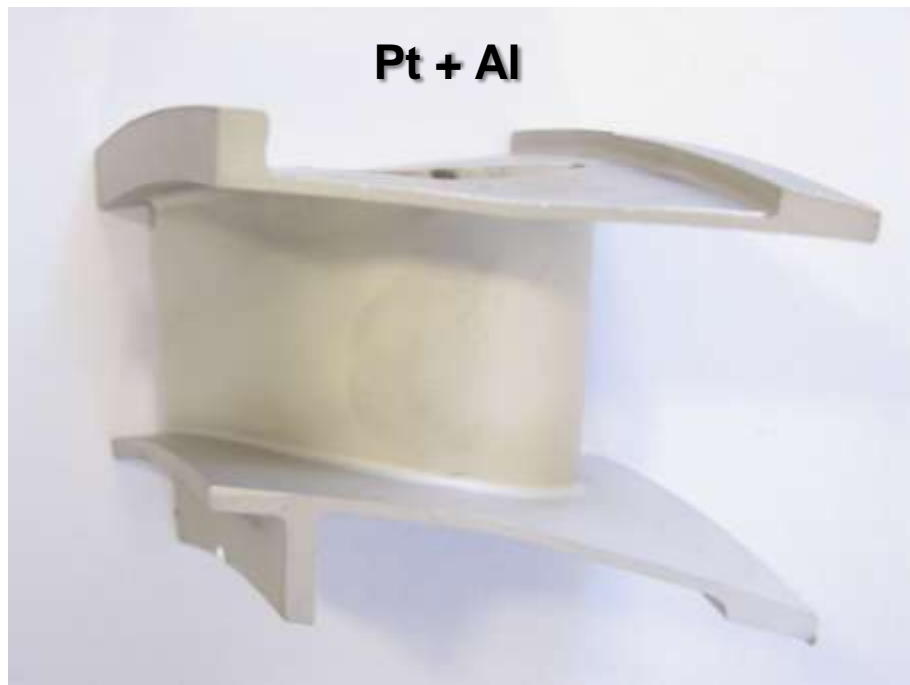
**Komora spalania
– powłokowe bariery
cieplne TBC**

**Łopatk sprężarki
– powłoki odporne
na erozję i korozję**



Podzadanie 2. POLITECHNIKA ŚLĄSKA

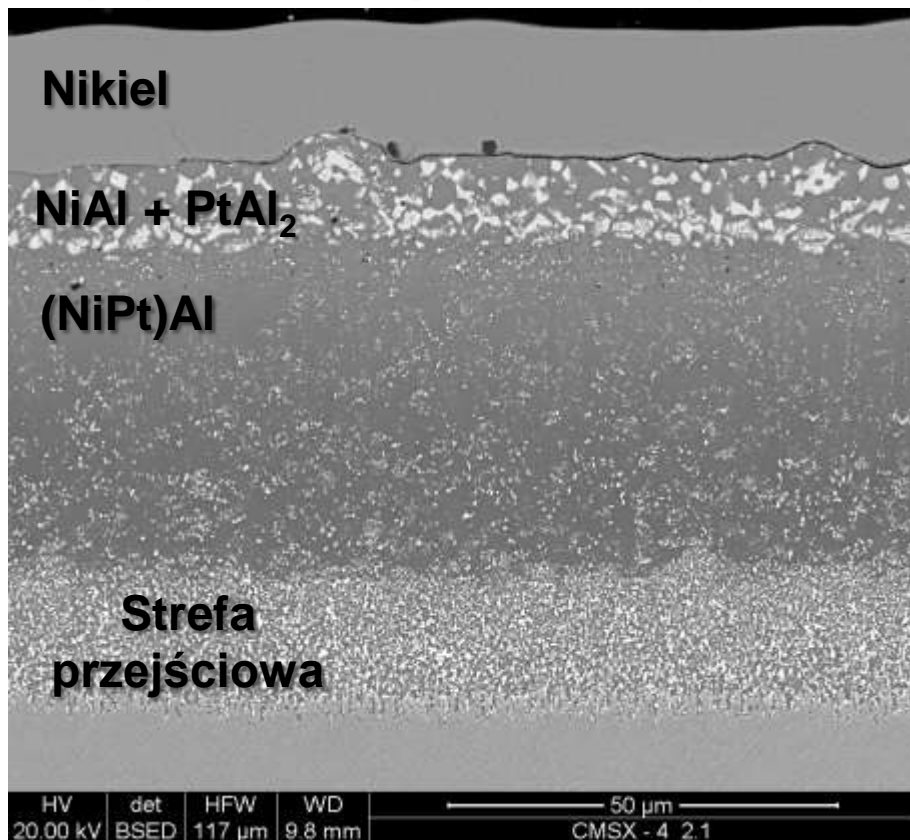
Opracowanie podstaw technologii wytwarzania modyfikowanych powłok aluminidkowych oraz krzemkowych metodami gazowymi w tym, stanowiących międzywarstwy pod powłoki TBC otrzymywane metodą EB-PVD na łopatkach kierujących turbiny.



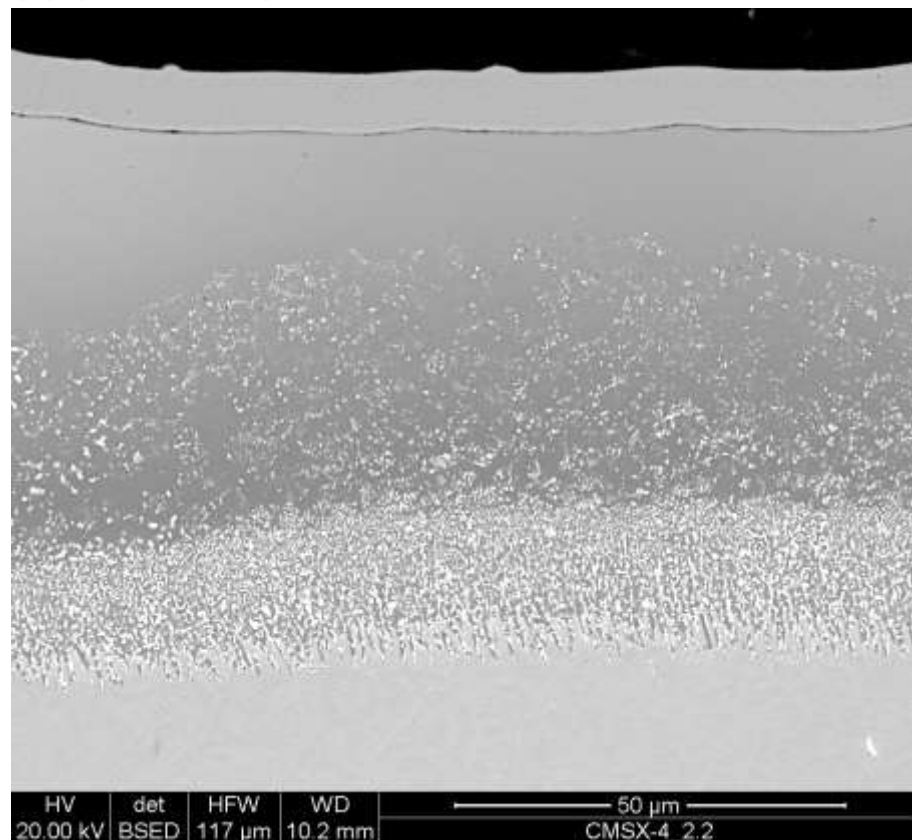
Przeprowadzono próbny proces platynowania i palladowania łopatek oraz aluminiowania. Łopatki przesłano do Ceramic Coating Center, Francja

Podzadanie 2 cd. POLITECHNIKA ŚLĄSKA

Opracowanie podstaw technologii wytwarzania modyfikowanych powłok aluminidkowych oraz krzemkowych metodami gazowymi w tym, stanowiących międzywarstwy pod powłoki TBC otrzymywane metodą EB-PVD na łopatkach kierujących turbiny.



CMSX - 4 + Pt + Al

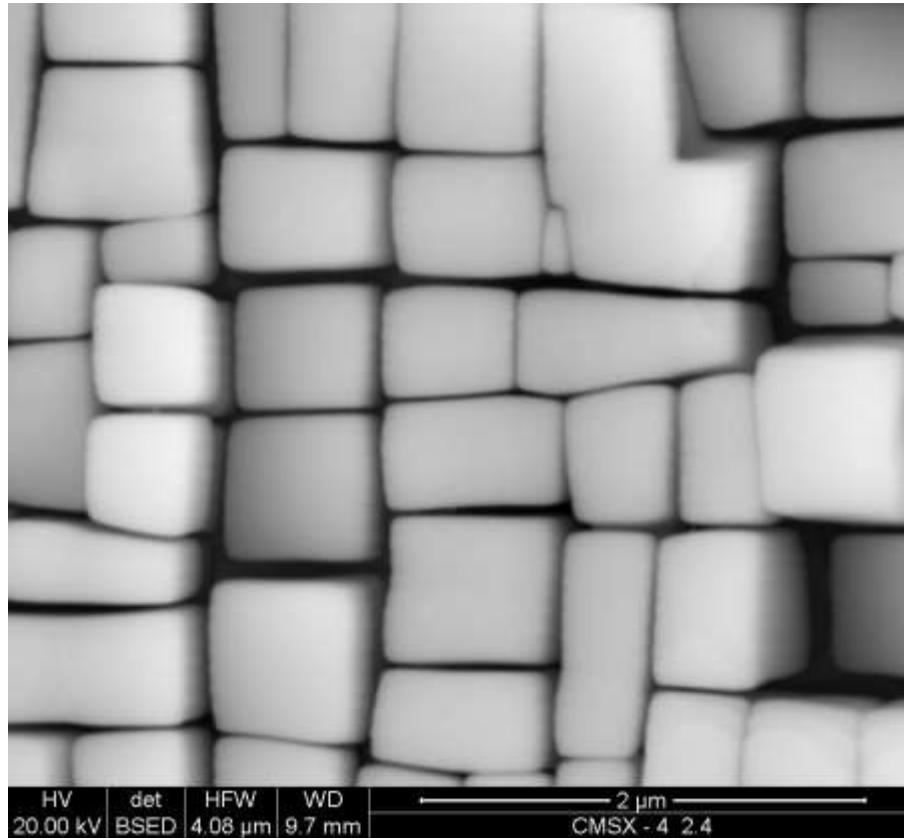
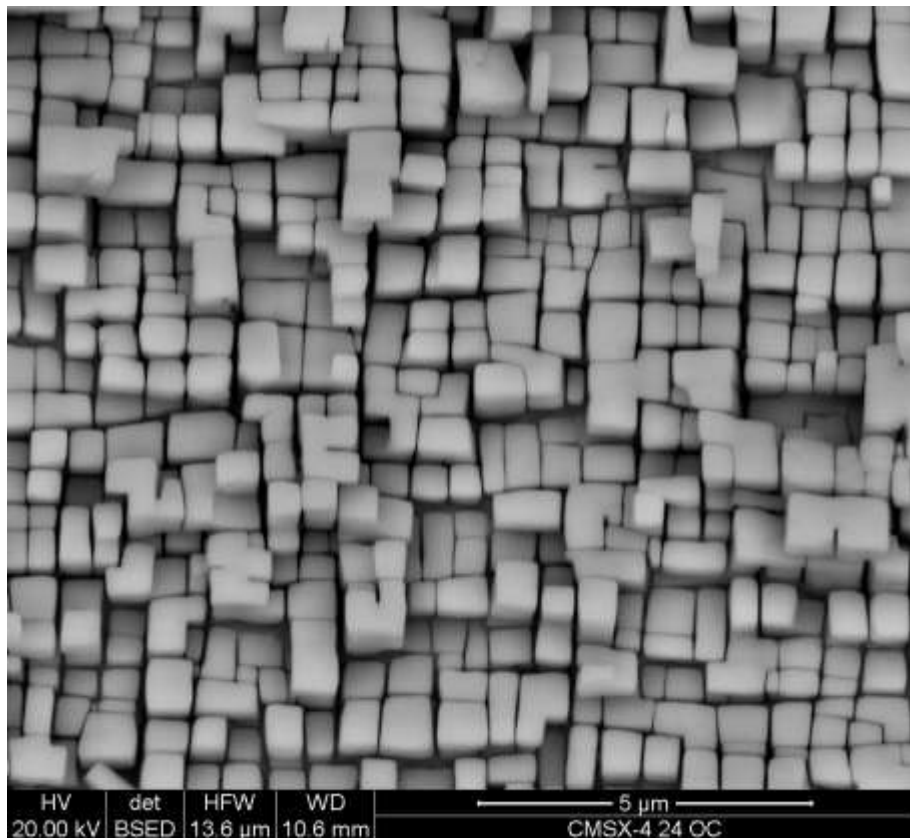


CMSX - 4 + Pd + Al

Przeprowadzono proces platynowania i palladowania próbek oraz aluminowania. Próbki przesłano do Ceramic Coating Center, Francja

Podzadanie 2 cd. POLITECHNIKA ŚLĄSKA

Opracowanie podstaw technologii wytwarzania modyfikowanych powłok aluminidkowych oraz krzemkowych metodami gazowymi w tym, stanowiących międzywarstwy pod powłoki TBC otrzymywane metodą EB-PVD na łopatkach kierujących turbiny.

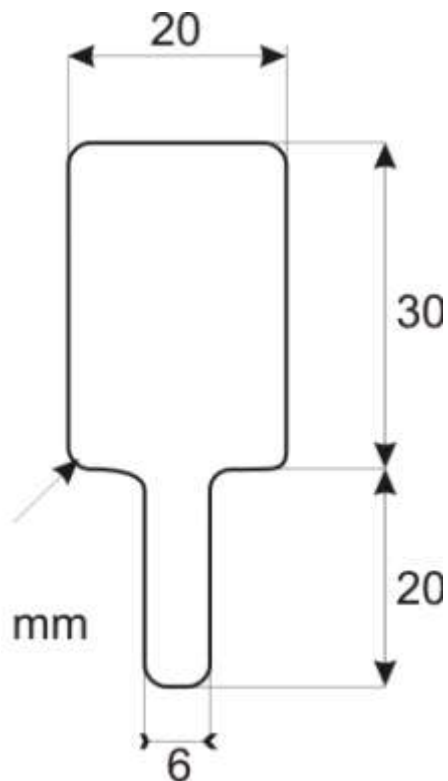


Struktura stopu CMSX-4 po pełnej obróbce cieplnej

Podzadanie 2cd. POLITECHNIKA ŚLĄSKA

Opracowanie podstaw technologii wytwarzania modyfikowanych powłok aluminikowych oraz krzemkowych metodami gazowymi w tym, stanowiących międzywarstwy pod powłoki TBC otrzymywane metodą EB-PVD na łopatkach kierujących turbiny.

Powłoki modyfikowane krzemem na stopach Nb





Podzadanie 4. POLITECHNIKA ŚLĄSKA

Badania właściwości fizycznych nowych materiałów ceramicznych oraz powłok TBC zawierających te materiały m.in. $\text{Re}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ o strukturze pyrochlorów modyfikowanych pierwiastkami ziem rzadkich (La, Gd, Nd, Sm, Eu) i mniejszym przewodnictwem cieplnym niż obecnie stosowane materiały na bazie tlenku cyrkonu.

Cel:

- Opracowanie danych porównawczych właściwości fizycznych materiałów stosowanych obecnie ($\text{ZrO}_2 \times \text{Y}_2\text{O}_3$) na powłokowe bariery cieplne z nowymi materiałami ceramicznymi modyfikowanymi pierwiastkami ziem rzadkich,
- Dobór materiałów powłokowych,
- Opracowanie danych dotyczących właściwości fizycznych powłokowych barier cieplnych wytworzonych z nowych materiałów ceramicznych modyfikowanych pierwiastkami ziem rzadkich.

Cel naukowy:

- Wyjaśnienie mechanizmu oddziaływania pierwiastków ziem rzadkich na właściwości fizyczne powłokowych barier cieplnych

Podzadanie 4cd. POLITECHNIKA ŚLĄSKA

Badania właściwości fizycznych nowych materiałów ceramicznych oraz powłok TBC zawierających te materiały m.in. $\text{Re}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ o strukturze pyrochlorów modyfikowanych pierwiastkami ziem rzadkich (La, Gd, Nd, Sm, Eu) i mniejszym przewodnictwem cieplnym niż obecnie stosowane materiały na bazie tlenku cyrkonu.



Aparatura do badań przewodnictwa cieplnego NETZSCH LFA 427

Podzadanie 4cd. POLITECHNIKA ŚLĄSKA

Badania właściwości fizycznych nowych materiałów ceramicznych oraz powłok TBC zawierających te materiały m.in. $\text{Re}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ o strukturze pyrochlorów modyfikowanych pierwiastkami ziem rzadkich (La, Gd, Nd, Sm, Eu) i mniejszym przewodnictwem cieplnym niż obecnie stosowane materiały na bazie tlenku cyrkonu.

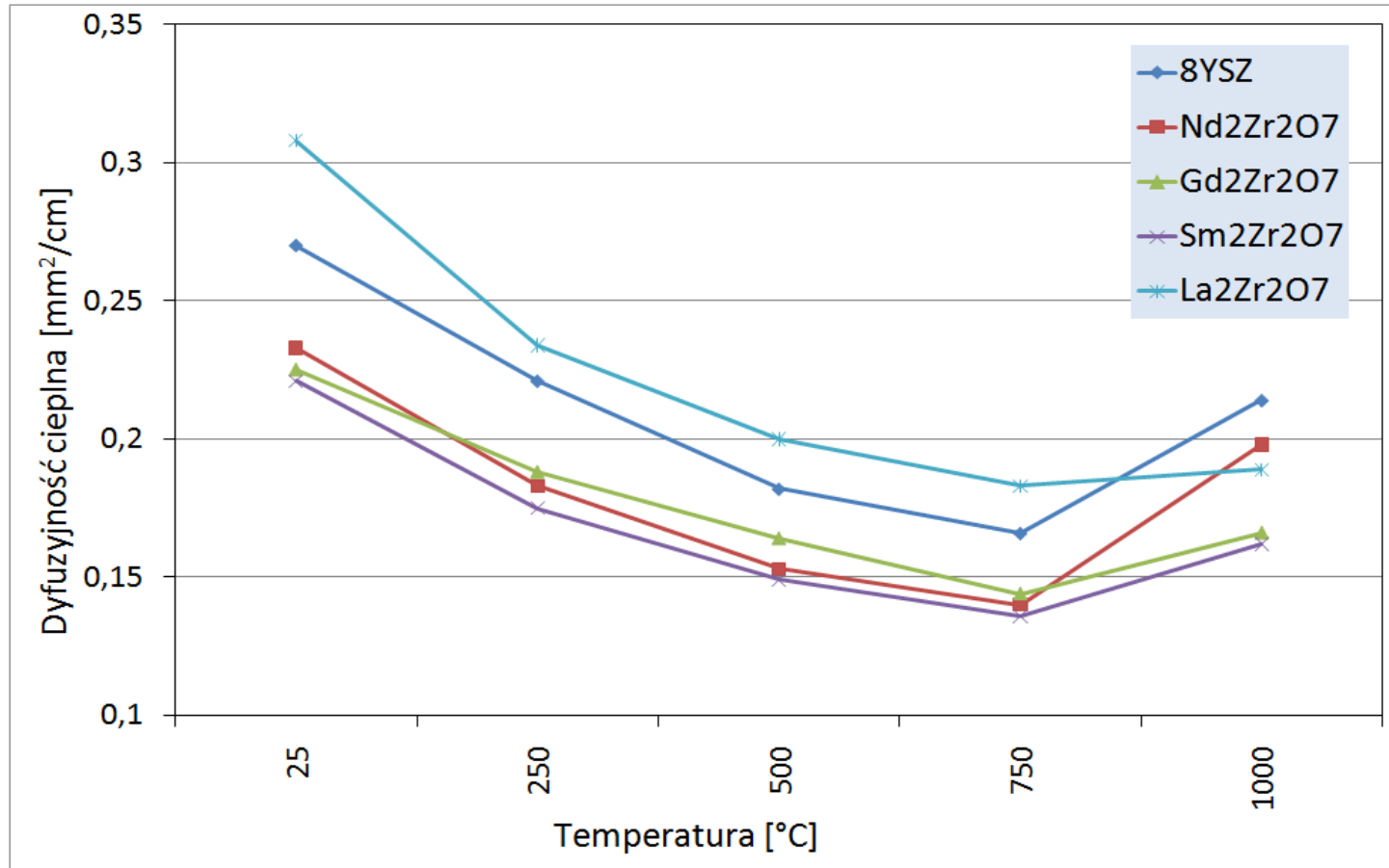
Określenie kryteriów oceny oraz zakresu badań i metodyki badawczej proszków nowego typu przeznaczonych do natryskiwania warstw TBC metodą APS

Merytoryczny zakres zadania obejmował:

1. charakterystykę materiałów nowego typu przeznaczonych do natryskiwania cieplnego warstw typu TBC,
2. charakterystyka strukturalną i technologiczną proszków,
3. określenie kryteriów oceny i zakresu badań mikrostruktury oraz własności technologicznych proszków nowego typu,
4. dobór metodyki badawczej
5. opracowanie zasad przygotowania preparatów badawczych.

Podzadanie 4cd. POLITECHNIKA ŚLĄSKA

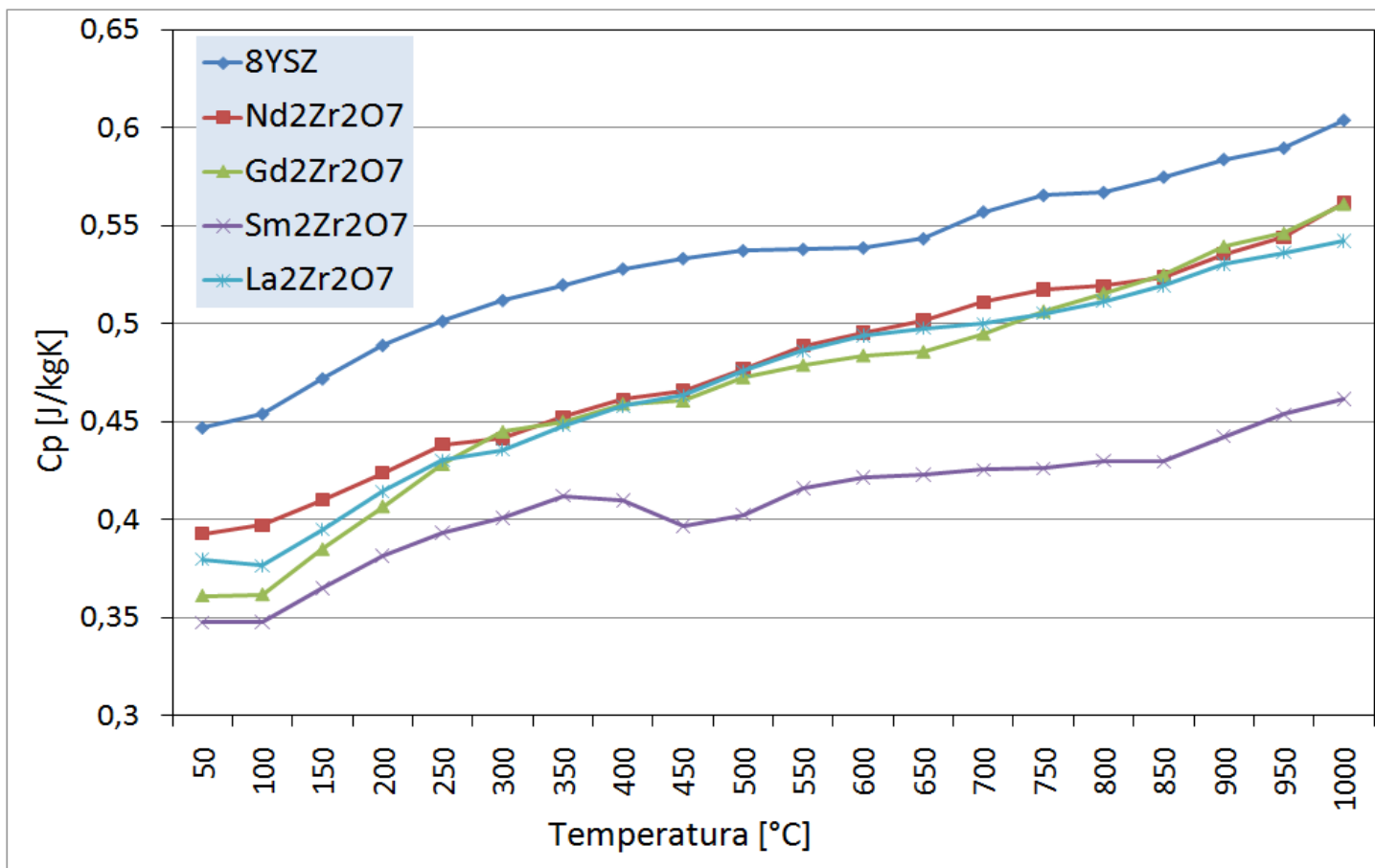
Badania właściwości fizycznych nowych materiałów ceramicznych oraz powłok TBC zawierających te materiały m.in. $\text{Re}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ o strukturze pyrochlorów modyfikowanych pierwiastkami ziem rzadkich (La, Gd, Nd, Sm, Eu) i mniejszym przewodnictwie cieplnym niż obecnie stosowane materiały na bazie tlenku cyrkonu.



Dyfuzyjność cieplna

Podzadanie 4cd. POLITECHNIKA ŚLĄSKA

Badania właściwości fizycznych nowych materiałów ceramicznych oraz powłok TBC zawierających te materiały m.in. $\text{Re}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ o strukturze pyrochlorów modyfikowanych pierwiastkami ziem rzadkich (La, Gd, Nd, Sm, Eu) i mniejszym przewodnictwie cieplnym niż obecnie stosowane materiały na bazie tlenku cyrkonu.



Ciepło właściwe



Podzadanie 6. POLITECHNIKA ŚLĄSKA

Opracowanie parametrów technologicznych procesu powłok TBC metodą natryskiwania cieplnego z zastosowaniem nowoczesnej aparatury TRIPLEX oraz materiałów ceramicznych.

Cel:

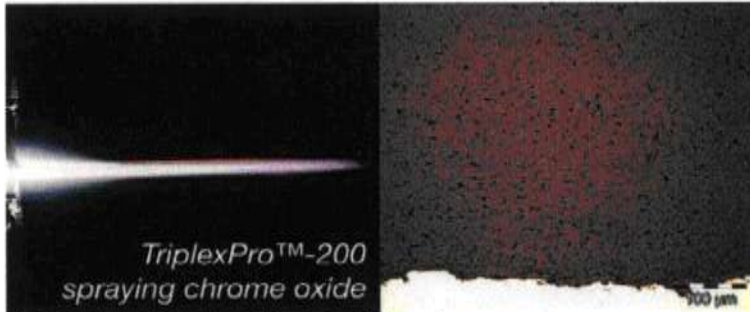
- Opracowanie podstaw technologii wytwarzania powłokowych barier cieplnych TBC na wybranych stopach oraz elementach turbin gazowych z wykorzystaniem nowych powłokowych materiałów ceramicznych modyfikowanych pierwiastkami ziem rzadkich.

Cel naukowy:

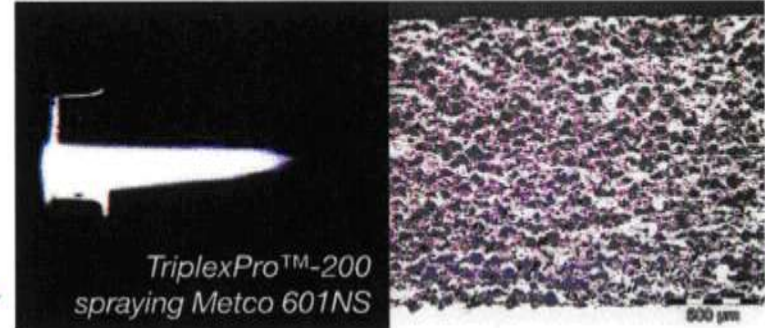
- wyjaśnienie mechanizmu powstawania powłoki ceramicznej z wykorzystaniem systemu TRIPLEX
- wyjaśnienie wpływu parametrów natryskiwania na zjawiska zachodzące na granicy międzywarstwa – powłoka ceramiczna,
- wyjaśnienie mechanizmu oddziaływania pierwiastków ziem rzadkich w powłoce ceramicznej na jej strukturę i wybrane właściwości fizyczne (przyczepność, pękanie, radioaktywność).

Podzadanie 6cd. POLITECHNIKA ŚLĄSKA

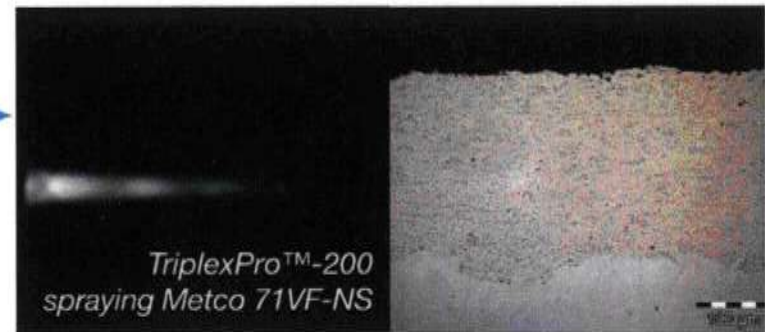
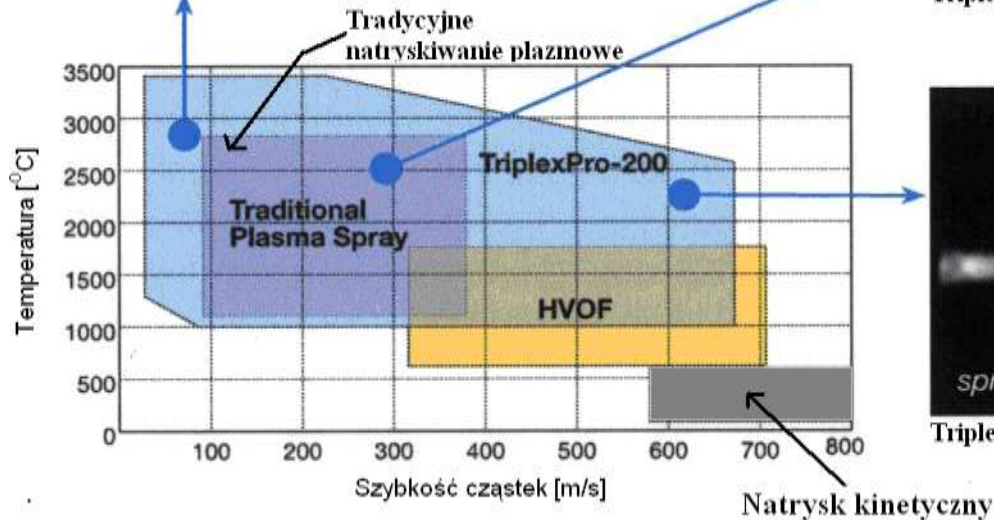
Opracowanie parametrów technologicznych procesu powłok TBC metodą natryskiwania cieplnego z zastosowaniem nowoczesnej aparatury TRIPLEX oraz materiałów ceramicznych.



TriplexPro-200 natryskiwanie tlenku chromu



TriplexPro-200 natryskiwanie Metco 601NS



TriplexPro-200 natryskiwanie Metco 71VF-NS

Zalety zastosowania aparatury Triplex w stosunku do standardowego APS

Podzadanie 6cd. POLITECHNIKA ŚLĄSKA

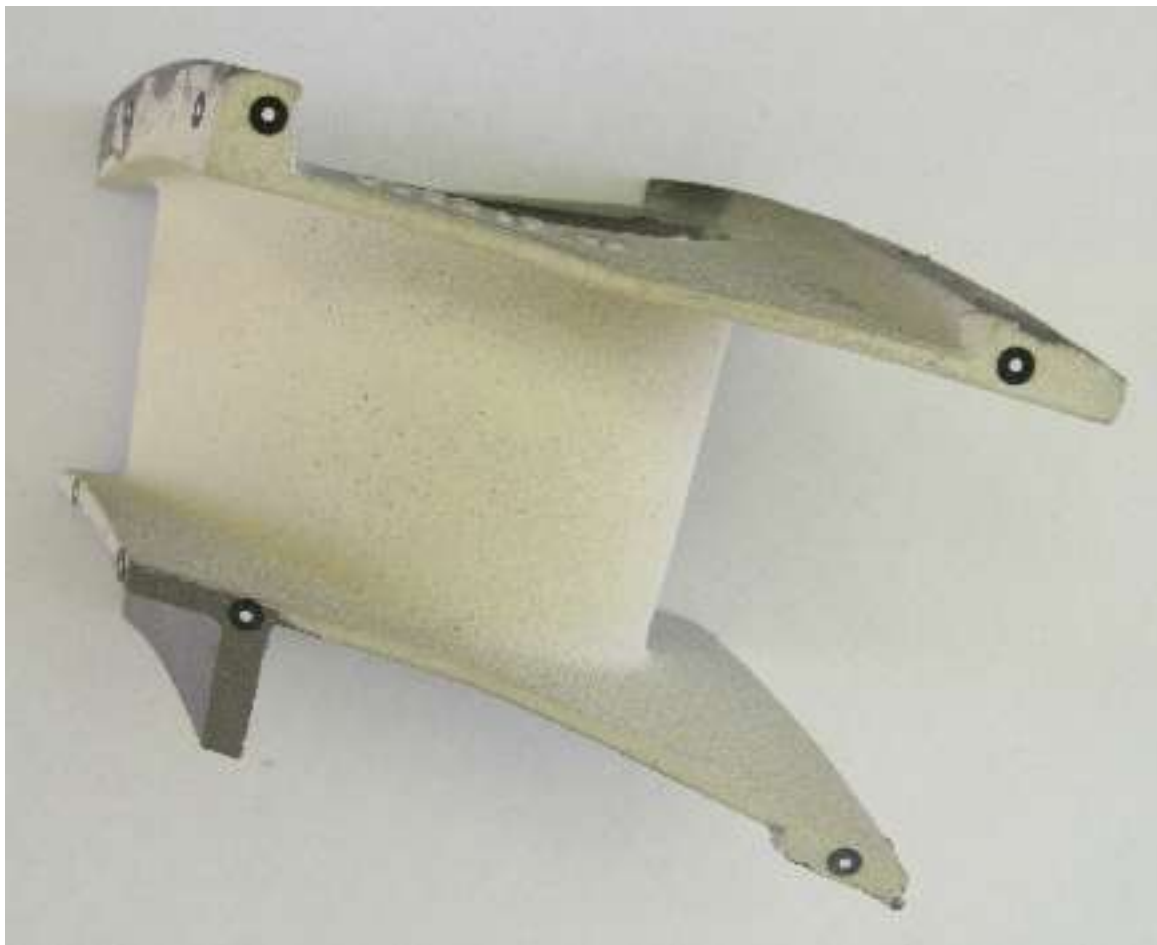
Opracowanie parametrów technologicznych procesu powłok TBC metodą natryskiwania cieplnego z zastosowaniem nowoczesnej aparatury TRIPLEX oraz materiałów ceramicznych.



System SULZER Metco TriplexPro – 200

Podzadanie 6cd. POLITECHNIKA ŚLĄSKA

Opracowanie parametrów technologicznych procesu powłok TBC metodą natryskiwania cieplnego z zastosowaniem nowoczesnej aparatury TRIPLEX oraz materiałów ceramicznych.



**Próby wytwarzania powłok TBC z zastosowaniem aparatury
TriplexPro – 200**

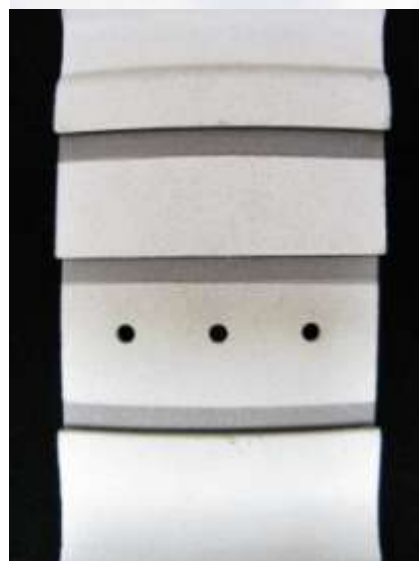
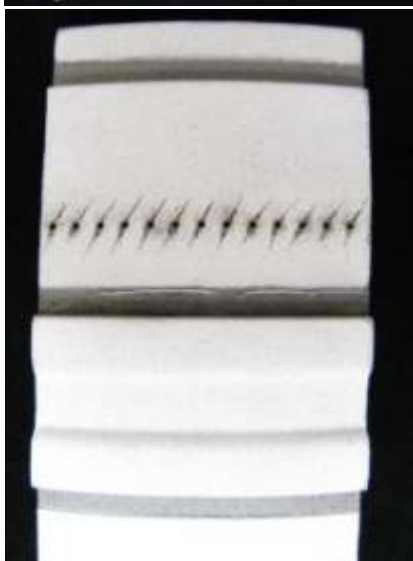
Podzadanie 6cd. POLITECHNIKA ŚLĄSKA

Opracowanie parametrów technologicznych procesu powłok TBC metodą natryskiwania cieplnego z zastosowaniem nowoczesnej aparatury TRIPLEX oraz materiałów ceramicznych.



Konstrukcja komory spalania demonstratora:

- analiza materiałów,
- analiza operacji wykonania,
- analiza obróbki cieplnej,
- analiza technologii powłok,
- analiza konstrukcji pod kątem możliwości wykonania powłok





Podzadanie 8. POLITECHNIKA ŚLĄSKA

Badania degradacji powłok w warunkach cyklicznego utleniania w środowisku gazów spalinowych (BURNER RIG). Badania nieniszczące powłok.

Cel:

- Określenie wpływu struktury, grubości składu chemicznego oraz parametrów obróbki cieplnej powłok dyfuzyjnych aluminiowych oraz krzemkowych na stopach żarowytrzymałych i wysokotopliwych na ich właściwości użytkowe

Cel naukowy:

- wyjaśnienie mechanizmów degradacji międzywarstw dyfuzyjnych oraz powłokowych barier cieplnych w warunkach testów cyklicznego i statycznego utleniania,
- wyjaśnienie mechanizmów degradacji powłok dyfuzyjnych, międzywarstw oraz powłokowych barier cieplnych w testach korozji w gazach spalinowych.

Podzadanie 8cd. POLITECHNIKA ŚLĄSKA

Badania degradacji powłok w warunkach cyklicznego utleniania w środowisku gazów spalinowych (BURNER RIG). Badania nieniszczące powłok.



Aparatura BURNER RIG

Podzadanie 8cd. POLITECHNIKA ŚLĄSKA

Badania degradacji powłok w warunkach cyklicznego utleniania w środowisku gazów spalinowych (BURNER RIG). Badania nieniszczące powłok.



Podzadanie 8cd. POLITECHNIKA ŚLĄSKA

Badania degradacji powłok w warunkach cyklicznego utleniania w środowisku gazów spalinowych (BURNER RIG). Badania nieniszczące powłok.



Podzadanie 10. POLITECHNIKA ŚLĄSKA

Wykonanie powłokowych barier cieplnych z wykorzystaniem metody gazowego aluminiowania pod obniżonym ciśnieniem oraz metodą EB-PVD na łopatkach kierujących turbiny. Badania nieniszczące powłok.

Cel:

- Wykonanie modyfikowanych międzywarstw aluminiowych metodą gazową o zróżnicowanej strukturze i składzie chemicznym,
- Przeprowadzenie prób wytwarzania powłok ceramicznych na łopatkach kierujących turbiny (np. AKTS) metodą EB-PVD.

Cel naukowy:

- opis zjawisk fizycznych na granicy międzywarstwa podłoża podczas nanoszenia powłoki,
- próba opisu mechanizmu wzrostu powłoki ceramicznej w procesie EB-PVD,
- opis cech struktury oraz składu fazowego i chemicznego międzywarstw oraz powłok ceramicznych wytworzonych metodami dyfuzyjnymi oraz CVD.

Podzadanie 10cd. POLITECHNIKA ŚLĄSKA

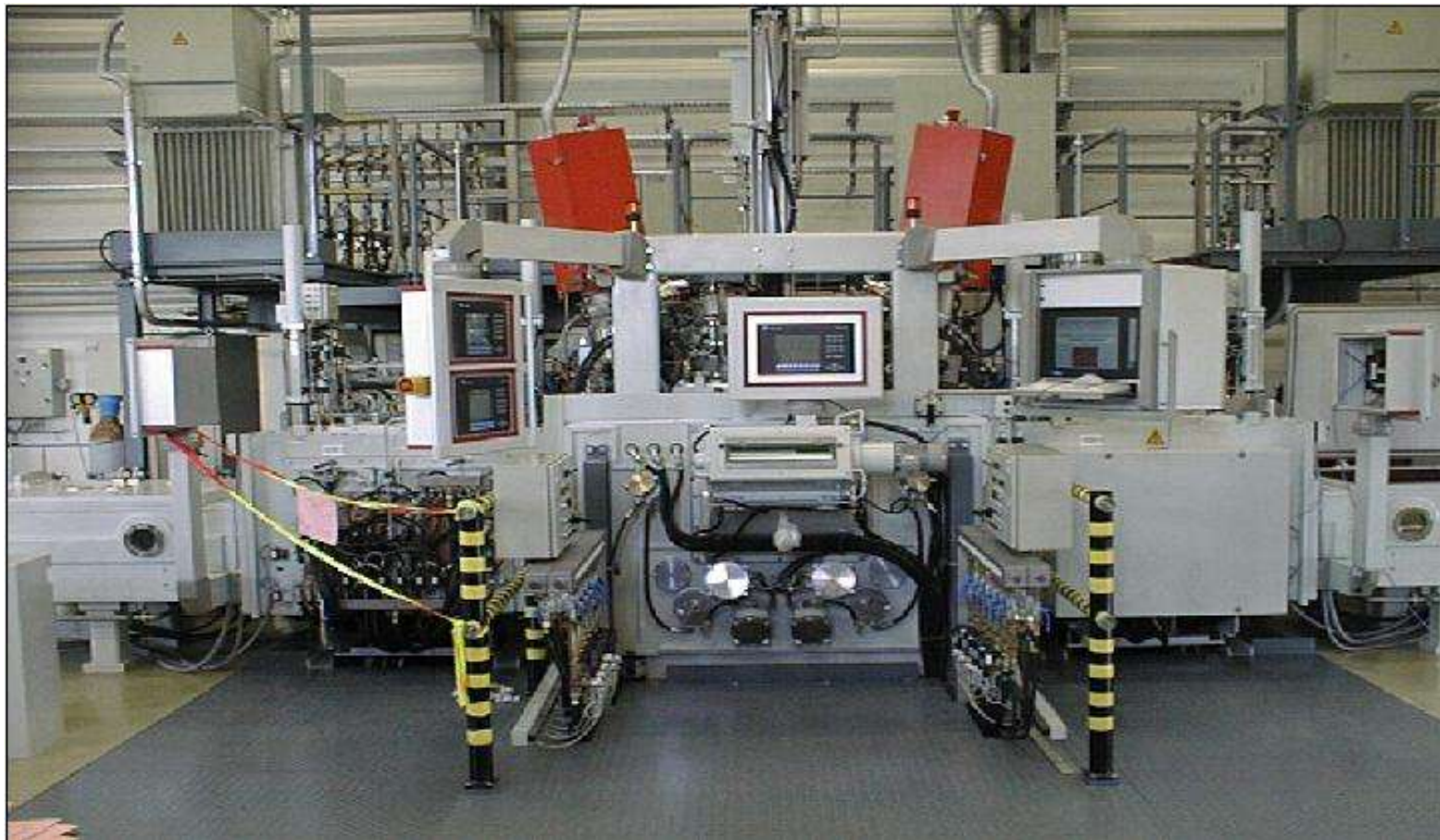
Wykonanie powłokowych barier cieplnych z wykorzystaniem metody gazowego aluminowania pod obniżonym ciśnieniem oraz metodą EB-PVD na łopatkach kierujących turbiny. Badania nieniszczące powłok.



Prototypowe stanowisko do dyfuzyjnego aluminowania pod obniżonym ciśnieniem, PZL WSK Rzeszów

Podzadanie 10cd. POLITECHNIKA ŚLĄSKA

Wykonanie powłokowych barier cieplnych z wykorzystaniem metody gazowego aluminiowania pod obniżonym ciśnieniem oraz metodą EB-PVD na łopatkach kierujących turbiny. Badania nieniszczące powłok.



**Współpraca z firmą Ceramic Coating Center, France
przy wytwarzaniu powłok ceramicznych EB-PVD**

Podzadanie 10cd. POLITECHNIKA ŚLĄSKA

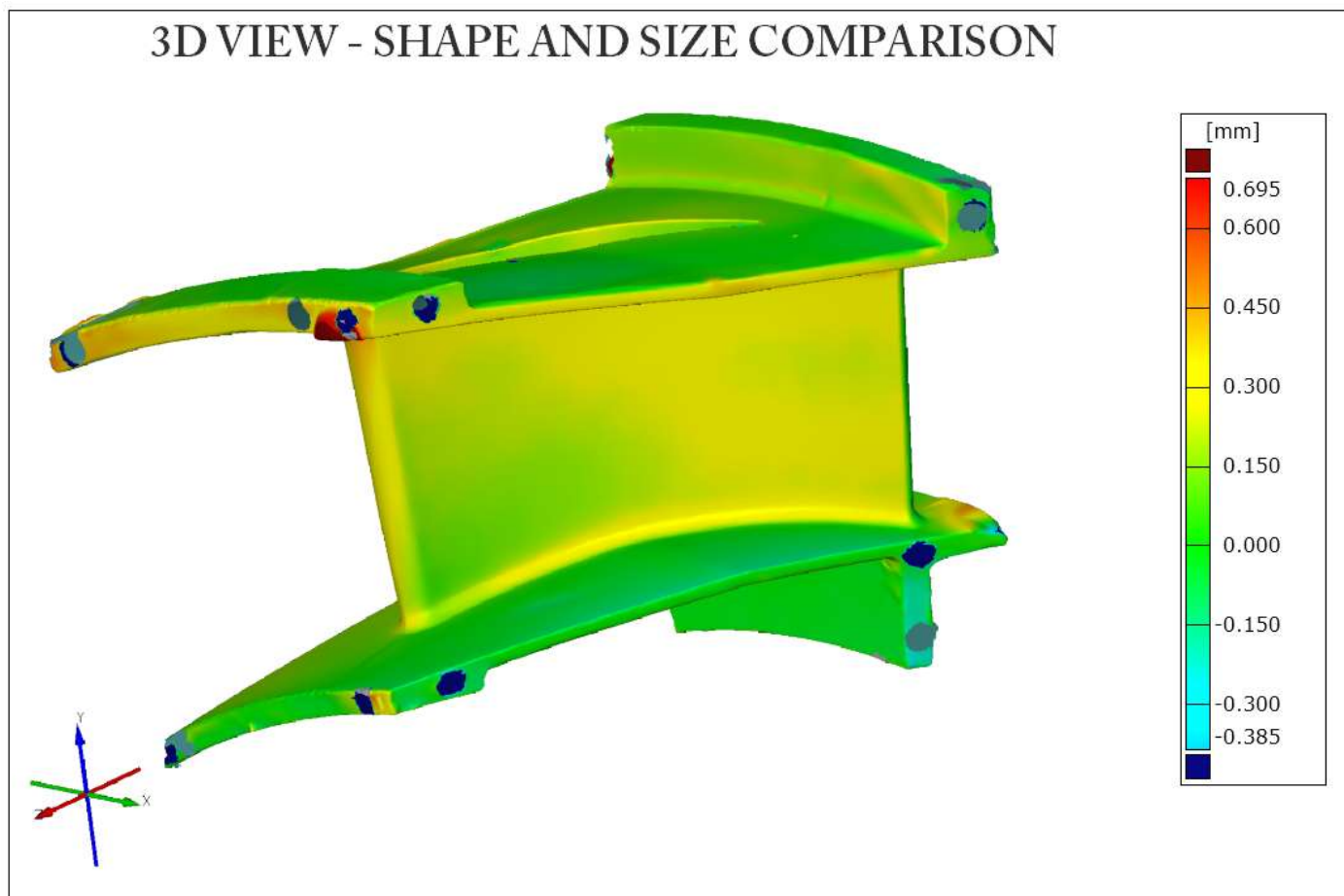
Wykonanie powłokowych barier cieplnych z wykorzystaniem metody gazowego aluminowania pod obniżonym ciśnieniem oraz metodą EB-PVD na łopatkach kierujących turbiny. Badania nieniszczące powłok.



Łopatki I stopnia AKTS silnika PZL-10W po procesie aluminowania

Podzadanie 10cd. POLITECHNIKA ŚLĄSKA

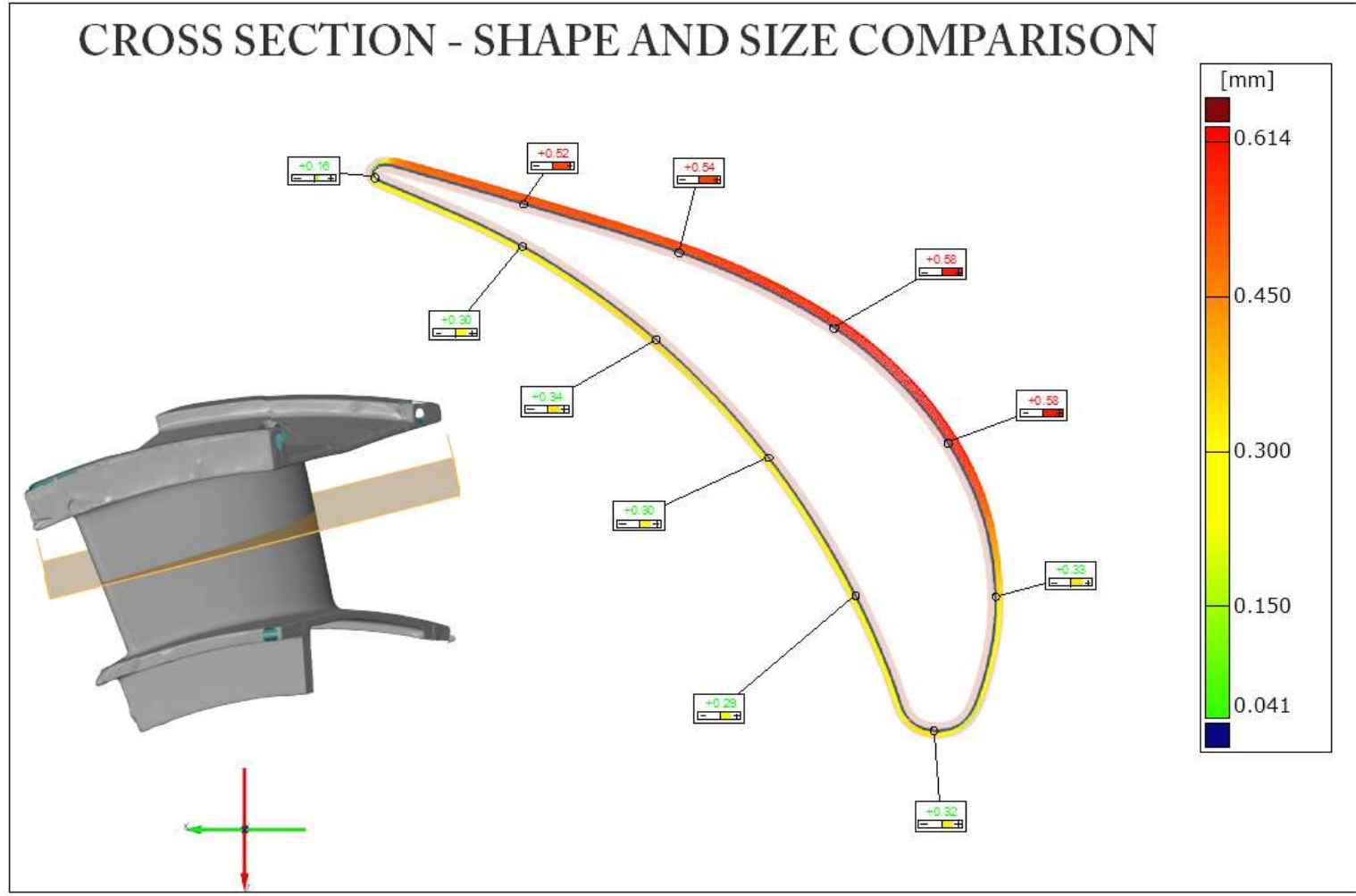
Wykonanie powłokowych barier cieplnych z wykorzystaniem metody gazowego aluminiowania pod obniżonym ciśnieniem oraz metodą EB-PVD na łopatkach kierujących turbiny. Badania nieniszczące powłok.



**Wyniki optycznego skanowania łopatki I stopnia AKTS.
Montaż aparatury – styczeń 2010**

Podzadanie 10cd. POLITECHNIKA ŚLĄSKA

Wykonanie powłokowych barier ciepłych z wykorzystaniem metody gazowego aluminiowania pod obniżonym ciśnieniem oraz metodą EB-PVD na łopatkach kierujących turbiny. Badania nieniszczące powłok.



Badania nieniszczące powłok.



Podzadanie 3. POLITECHNIKA RZESZOWSKA

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.

Cel:

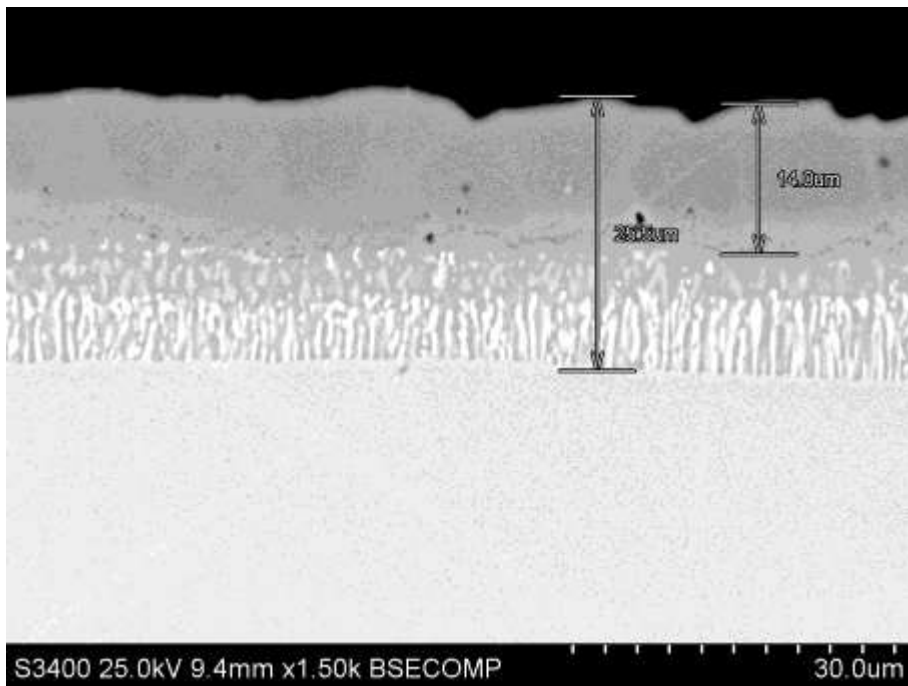
- Zwiększenie trwałości łopatek wirujących (roboczych) silnika lotniczego wykonanych ze stopów monokrystalicznych oraz z wewnętrznymi kanałami chłodzącymi.
- Opracowanie podstaw technologii wytwarzania powłok ochronnych odpornych na wysokotemperaturową korozję metodą CVD z wykorzystaniem aparatury IonBond.

Cel naukowy:

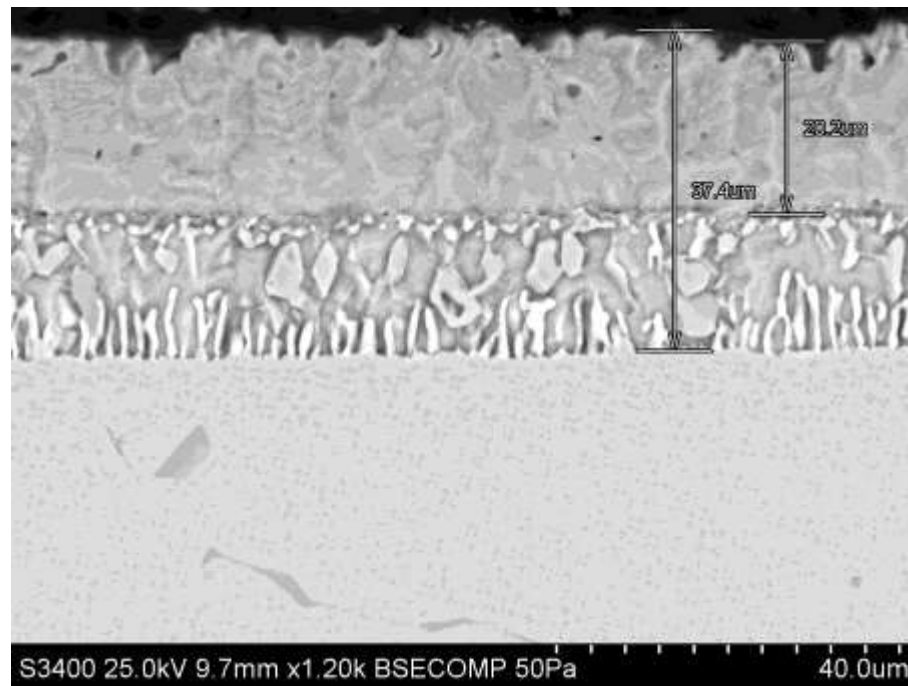
- Wyjaśnienie zjawisk fizycznych i chemicznych zachodzących w procesie jednoczesnego osadzania aluminiowych i pierwiastka modyfikującego.
- Wyjaśnienie mechanizmów oddziaływania pierwiastków reaktywnych na strukturę skład fazowy wybrane właściwości powłok aluminiowych wytwarzanych metodą CVD.

Podzadanie 3. POLITECHNIKA RZESZOWSKA

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



Warstwa uzyskana przy ciśnieniu 250 hPa,
temp. 1050°C, czas 8 h



Warstwa uzyskana przy ciśnieniu 500 hPa,
temp. 1050°C, czas 8 h

Przeprowadzono wstępne procesy aluminidkowania dla ustalenia sposobu oddziaływania warunków technologicznych na głębokość i budowę wytworzonych warstw.

Podzadanie 3. POLITECHNIKA RZESZOWSKA

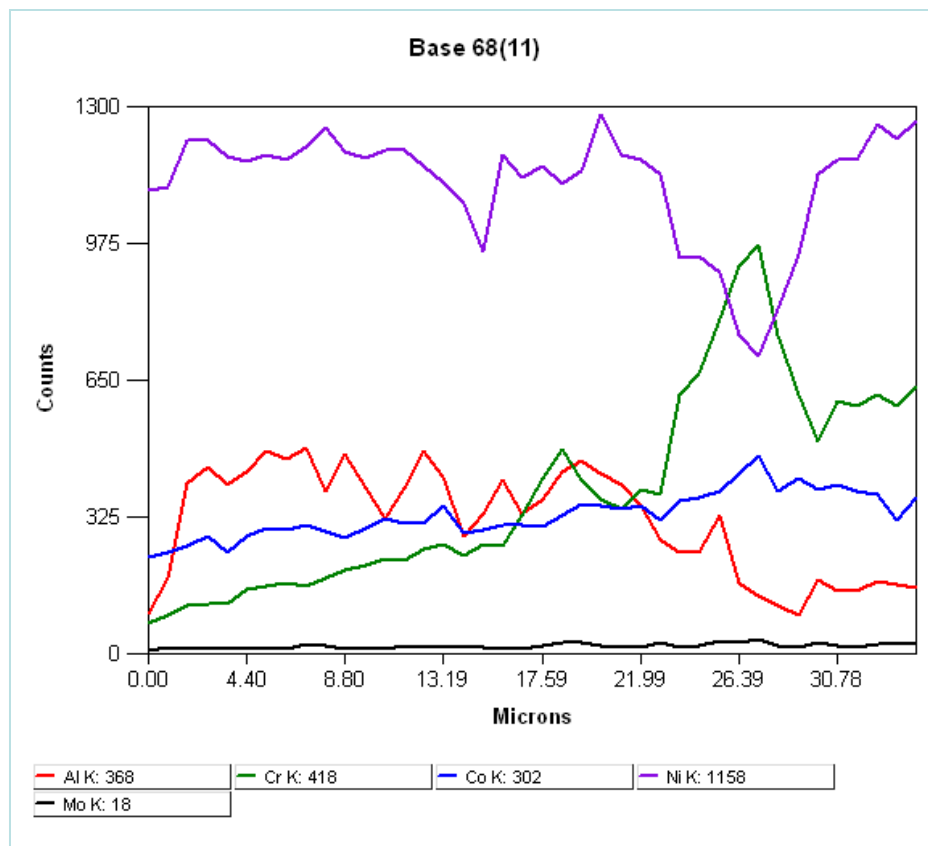
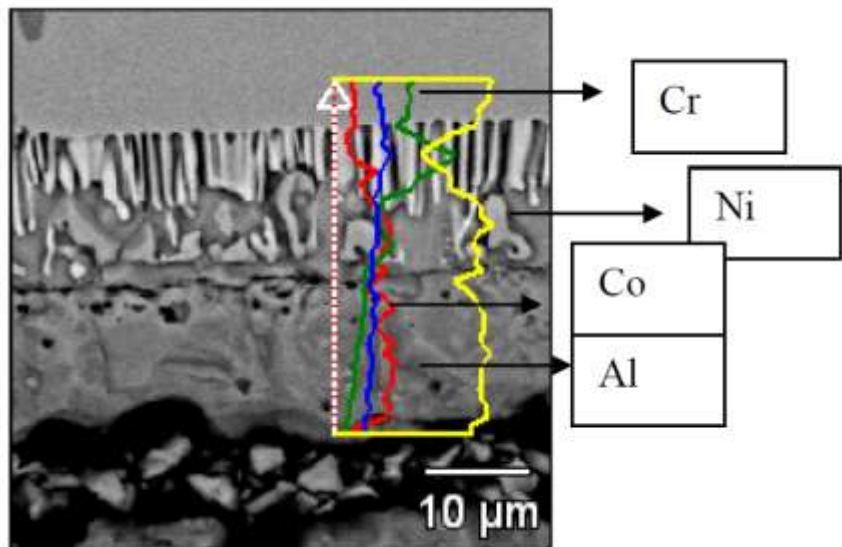
Opracowanie podstaw technologii oraz parametrów technologii wytwarzania nowych modyfikowanych powłok aluminiowych metodą CVD w tym międzywarstw stanowiących alternatywę dla międzywarstw typu MeCrAlY pod powłokowe bariery ciepłne.

Opracowano założenia dla przygotowania i sposobu rozmieszczenia próbek w reaktorze. Stosowano ażurowe grafitowe segmenty umożliwiające swobodny przepływ gazu roboczego.



Podzadanie 3. POLITECHNIKA RZESZOWSKA

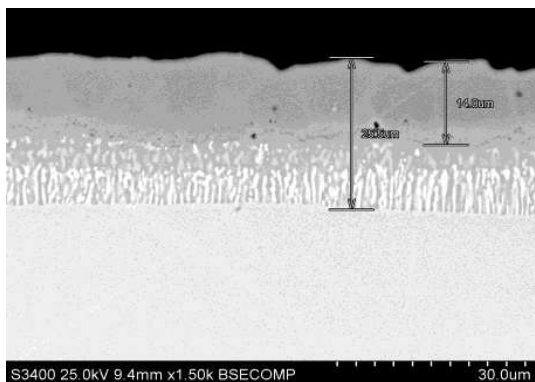
Opracowanie podstaw technologii oraz parametrów technologii wytwarzania nowych modyfikowanych powłok aluminidkowych metodą CVD w tym międzywarstw stanowiących alternatywę dla międzywarstw typu MeCrAlY pod powłokowe bariery ciepłne.



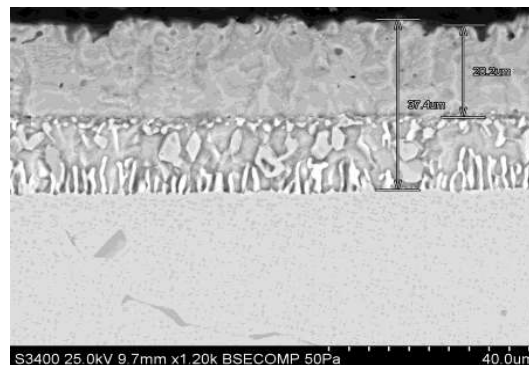
Rozkład zawartości pierwiastków na przekroju warstwy aluminidkowej uzyskanej na podłożu z nadstopu niklu Udimet 700 w temperaturze 1050°C i w czasie 4h

Podzadanie 3. POLITECHNIKA RZESZOWSKA

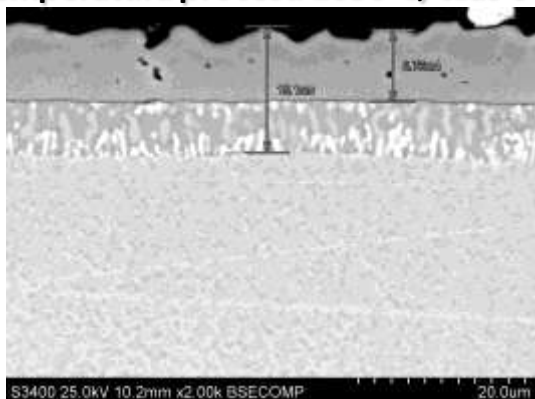
Opracowanie podstaw technologii oraz parametrów technologii wytwarzania nowych modyfikowanych powłok aluminidkowych metodą CVD w tym międzywarstw stanowiących alternatywę dla międzywarstw typu MeCrAlY pod powłokowe bariery ciepłne.



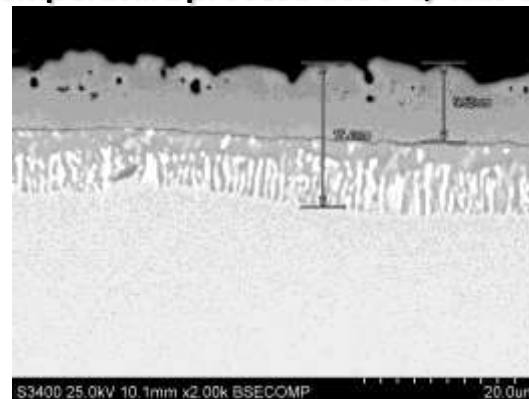
Warstwa wytworzona przy ciśnieniu 150 hPa,
Temperatura procesu 1050°C, czas 6 h



Warstwa wytworzona przy ciśnieniu 250 hPa,
Temperatura procesu 1050°C, czas 8 h



Warstwa wytworzona przy ciśnieniu 150 hPa,
Temperatura procesu 1050°C, czas 4 h



Warstwa wytworzona przy ciśnieniu 250 hPa,
Temperatura procesu 1050°C, czas 4 h

Mikrostruktura warstwy aluminidkowej dla różnych parametrów procesu CVD uzyskanej dla różnych warunków procesu aluminidkowania

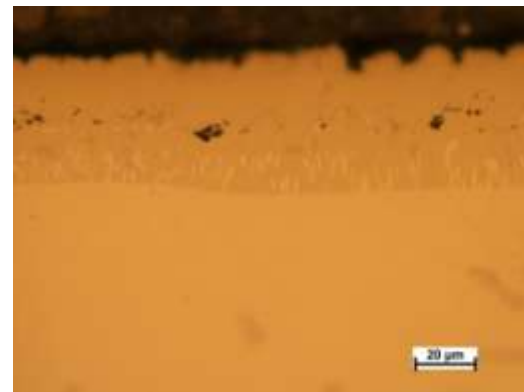
Podzadanie 3. POLITECHNIKA RZESZOWSKA

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

**Proces niskoaktywny prowadzony w temperaturze 1050 °C
w czasie 8h przy ciśnieniu 150 mbar**

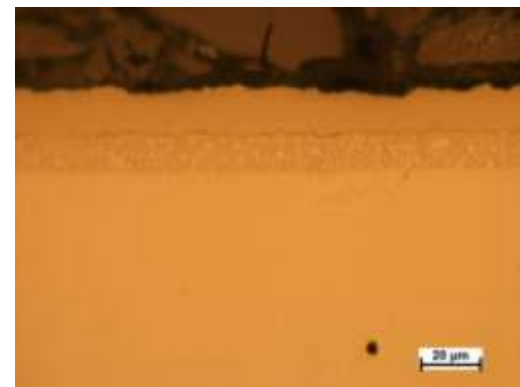
Numer pomiaru	Strefa dyfuzyjna	Strefa zewnętrzna	Całkowita głębokość
1	20,6	21,51	42,11
2	20,26	20,0	42,26
3	17,9	23,31	41,21
4	25,11	22,26	47,37
5	20,3	19,85	40,15
6	23,46	24,36	47,82
Wartość średnia	21,27	21,88	43,49

Mikrostruktura nadstopu Inconel 100



**Proces niskoaktywny prowadzony w temperaturze 1050 °C
i w czasie 2h przy ciśnieniu 150 mbar**

Numer pomiaru	Strefa dyfuzyjna	Strefa zewnętrzna	Całkowita głębokość
1	13,23	15,49	28,87
2	12,48	13,69	24,81
3	13,23	15,64	28,57
4	13,23	16,09	26,77
5	14,59	16,39	26,02
6	12,33	13,23	29,18
Wartość średnia	13,18	15,09	27,37



Wykonano badania grubości warstwy uzyskanej dla różnych warunków procesu aluminidkowania: temperatura procesu, czas oraz ciśnienie w reaktorze.



Podzadanie 7. POLITECHNIKA RZESZOWSKA

Badania właściwości fizycznych modyfikowanych powłok aluminiowych metodą CVD

Cel:

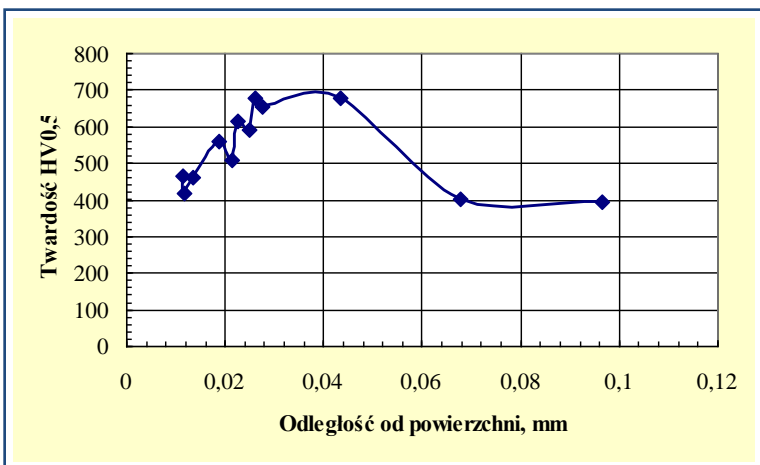
- Określenie wpływu powłok aluminiowych wytwarzanych metodą CVD na stopach żarowytrzymałych na właściwości fizyczne - wytrzymałość na pełzanie, przewodnictwo cieplne.

Cel naukowy:

- Opis mechanizmów niszczenia powłok w testach badań właściwości fizycznych – pełzania, zmęczenia

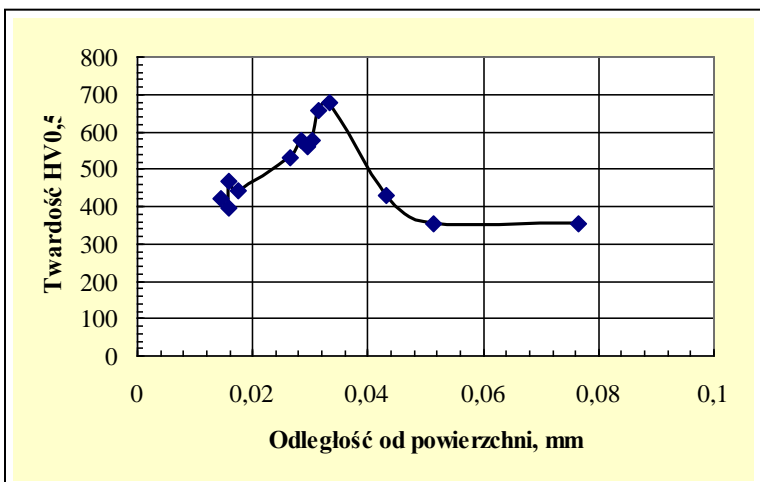
Podzadanie 3. POLITECHNIKA RZESZOWSKA

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 ciepłne.



Proces wysokoaktywny prowadzony w temperaturze 1020 °C w czasie 8h przy ciśnieniu 150 mbar.

Twardość warstwy aluminiowej wytworzonej na podłożu nadstopu niklu Inconel 713 LC



Proces niskoaktywny prowadzony w temperaturze 1020 °C w czasie 4h przy ciśnieniu 150 mbar.

Wykonano pomiary twardości warstwy aluminiowej otrzymanej przy różnych parametrach procesu aluminiowania

Podzadanie 3. POLITECHNIKA RZESZOWSKA

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

**Warunki procesu -
150 mbar, 1050 °C, 6 h
Proces niskoaktywny**

Parametry topografii

powierzchni:

Sa = 1.53 μm

Sq = 1.82 μm

Sp = 5.12 μm

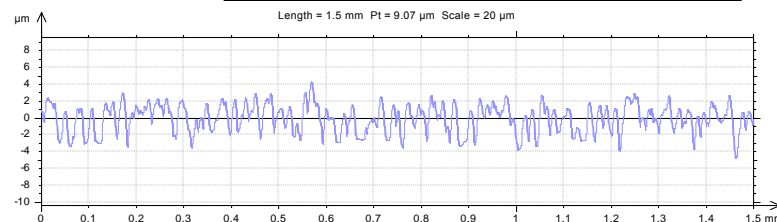
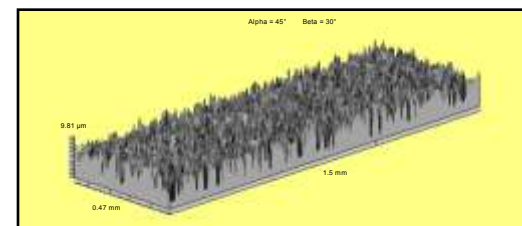
Sv = 4.69 μm

St = 9.81 μm

Ssk = -0.289

Sku = 2.1

Sz = 9.1 μm



**Warunki procesu -
250 mbar, 1050 °C, 6 h
Proces wysokoaktywny**

Parametry topografii

Powierzchni:

Sa = 0.63 μm

Sq = 0.822 μm

Sp = 4.87 μm

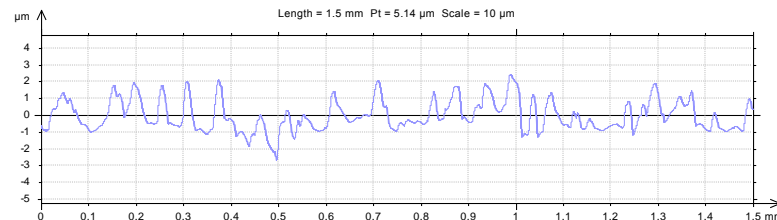
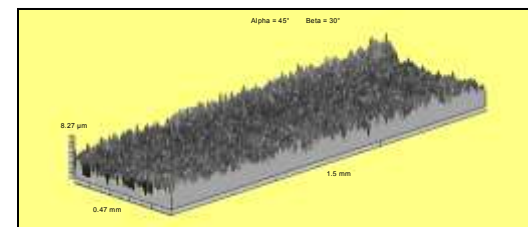
Sv = 3.4 μm

St = 8.27 μm

Ssk = 0.583

Sku = 4.4

Sz = 6.36 μm



Badania topografii powierzchni po aluminowaniu wykazały wpływ warunków procesu na topografię powierzchni – parametr istotny w przypadku nakładania powłoki typu TBC

Podzadanie 3. POLITECHNIKA RZESZOWSKA

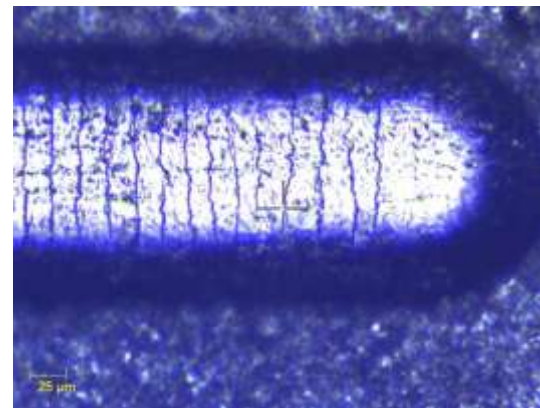
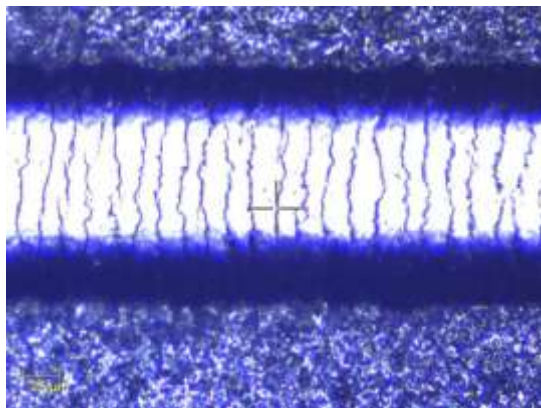
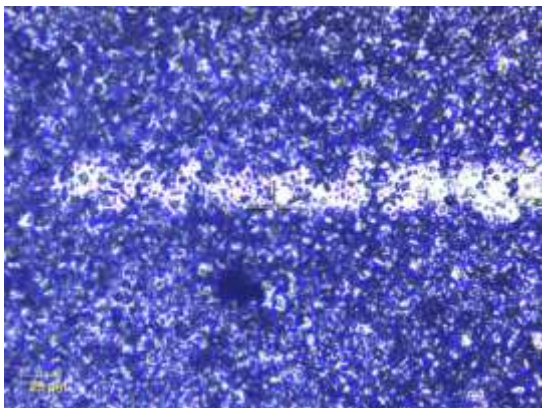
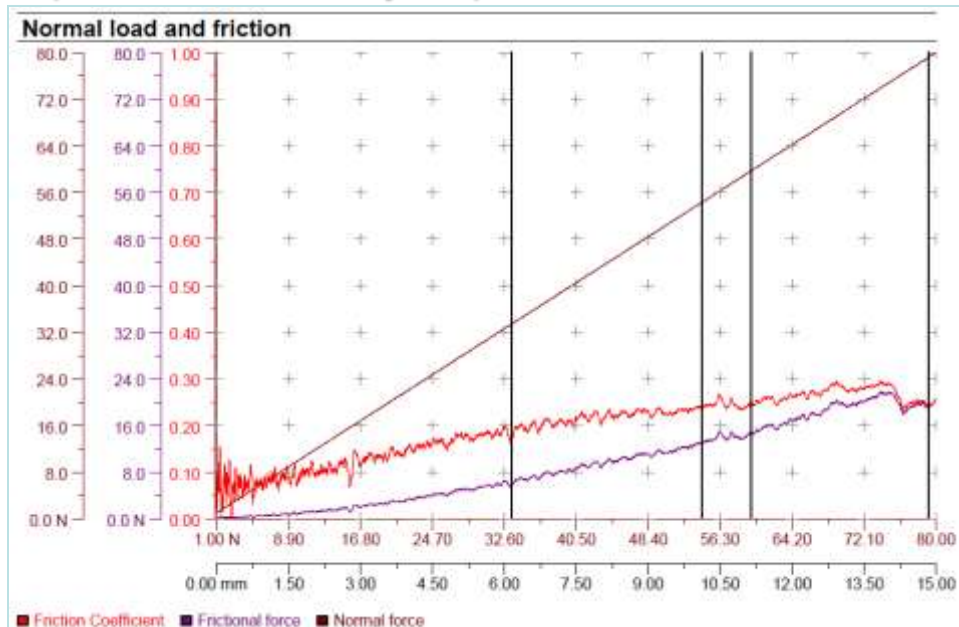
Opracowanie podstaw technologii oraz parametrów technologii wytwarzania nowych modyfikowanych powłok aluminidkowych metodą CVD w tym międzywarstw stanowiących alternatywę dla międzywarstw typu MeCrAlY pod powłokowe bariery ciepłne.

**Wyniki badań w próbie „scratch test”
dla warunków pomiaru:
Wartość siły: od 1 do 80 N;
Prędkość przyrostu siły: 5,27 N/min;
Długość odcinka: 15 mm;
Prędkość przemieszczania: 1mm/min**

**Mierzone wielkości: siła tarcia, siła normalna,
Współczynnik tarcia**

Inconel 100

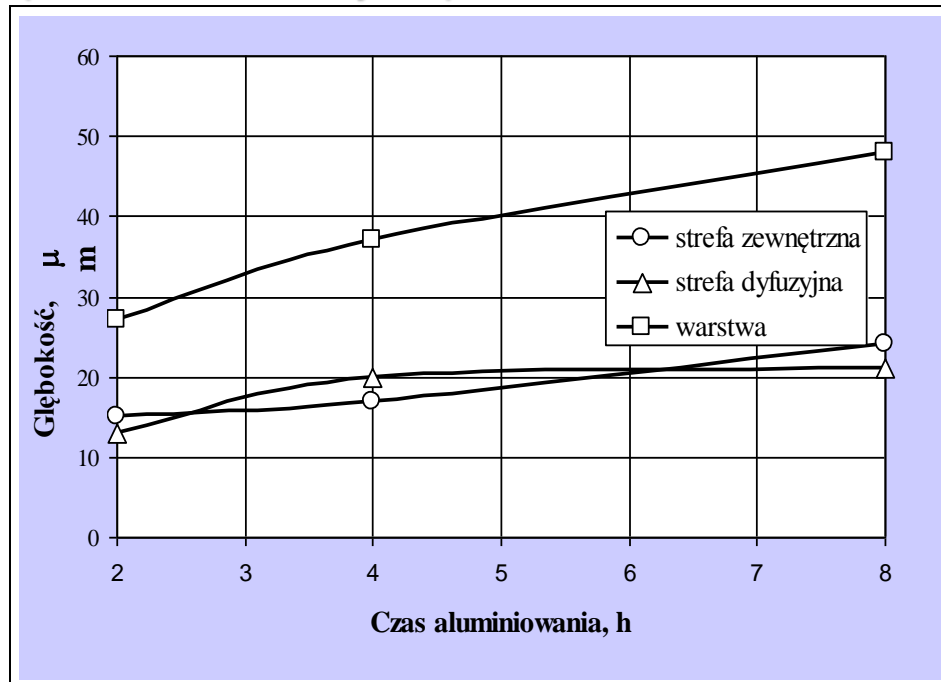
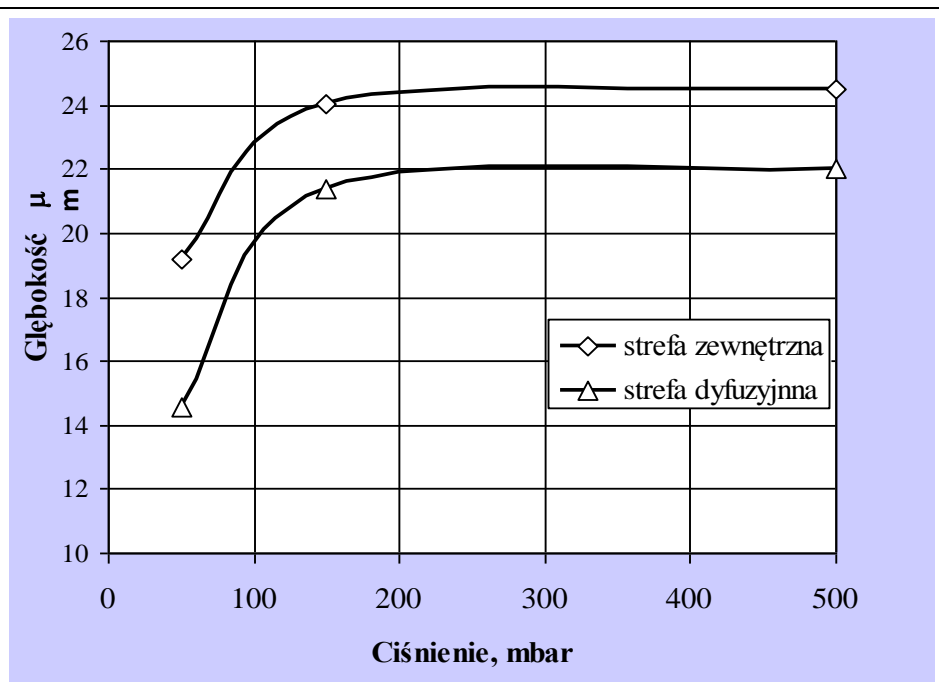
**Warunki procesu- 150 mbar, 1050 °C, 6 h
Proces niskoaktywny**



Podzadanie 3. POLITECHNIKA RZESZOWSKA

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 ciepłne.

Wpływ czasu aluminiowania na głębokość warstwy aluminikowej utworzonej w temperaturze 1050 °C i ciśnieniu 150 mbar na podłożu z nadstopu Inconel 713 LC

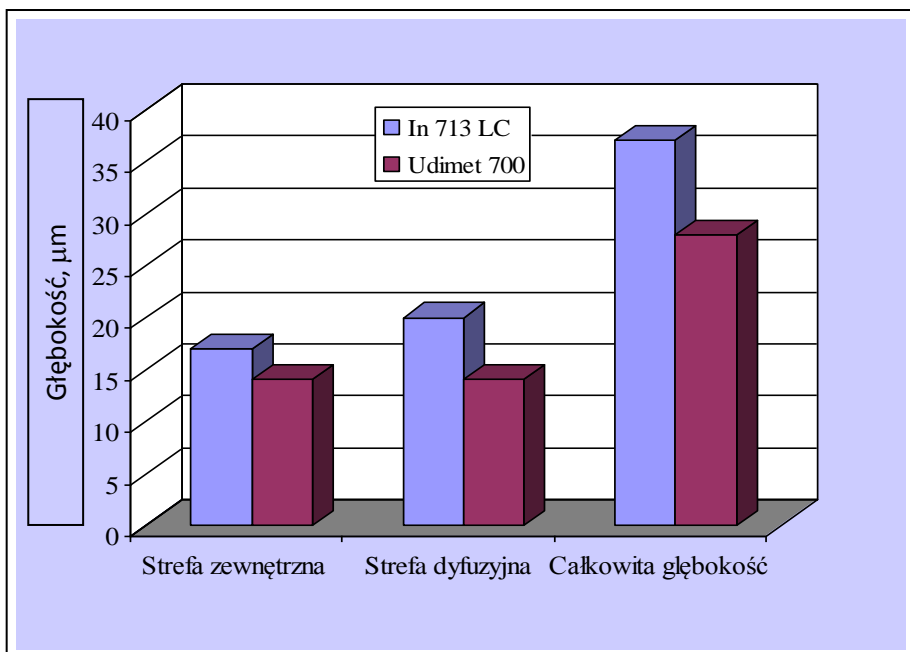


Wpływ ciśnienia gazu na głębokość warstwy aluminikowej utworzonej w temperaturze 1050°C i w czasie 8h na podłożu z nadstopu Inconel 713 LC

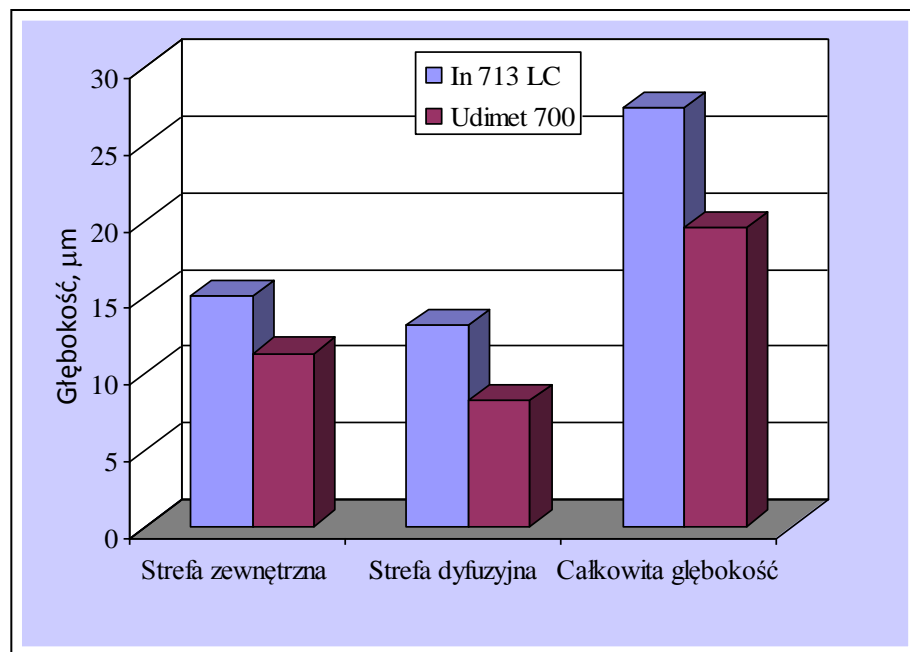
Oddziaływanie parametrów procesu CVD na głębokość utworzonej warstwy

Podzadanie 3. POLITECHNIKA RZESZOWSKA

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 ciepłne.



temperatura 1050 °C, czas 4h



temperatura 1050 °C, czas 2h

Wpływ gatunku nadstopu niklu i czasu procesu na głębokość poszczególnych stref warstwy aluminiowej wytworzonej w procesie niskoaktywnym CVD



Podzadanie 11. POLITECHNIKA RZESZOWSKA

Wytworzenie modyfikowanych powłok aluminiowych na łopatkach silnika lotniczego metodą CVD oraz ich przygotowanie do próby stanowiskowej silnika,

Cel:

- Opracowanie i wykonanie konstrukcji oprzyrządowania do realizacji procesu wytwarzania powłok na powierzchni łopatek z kanałami chłodzącymi.
- Wykonanie powłok aluminiowych metodą CVD o zróżnicowanej strukturze i składzie chemicznym na serii łopatek

Cel naukowy:

- próba opisu zjawisk fizycznych i chemicznych w procesie modyfikacji powłok aluminiowych pierwiastkami reaktywnymi metodą CVD,
- określenie oraz wyjaśnienie zróżnicowania w strukturze i grubości powłok na powierzchni zewnętrznej łopatek oraz wewnątrz kanałów chłodzących,
- opis cech struktury oraz składu fazowego i chemicznego międzywarstw oraz powłok ceramicznych utworzonych metodą CVD,

Podzadanie 11. POLITECHNIKA RZESZOWSKA

Wytworzenie modyfikowanych powłok aluminiowych na łopatkach silnika lotniczego metodą CVD oraz ich przygotowanie do próby stanowiskowej silnika,

Przygotowano linię technologiczną dla wytwarzania modyfikowanych powłok aluminiowych zawierającą generator zewnętrzny dla wytwarzania MeClx.

Planowane jest wytwarzanie warstw aluminiowych modyfikowanych Hf i Zr jako międzywarstw dla powłokowych barier cieplnych.



WNIOSKI

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



Podzadanie 9. POLITECHNIKA WARSZAWSKA

Opracowanie podstaw technologii wytwarzania dyfuzyjnych warstw powierzchniowych zwiększających odporność stopów tytanu na korozję wysokotemperaturową w temperaturze ok. 750°C,

Cel:

- Wykonanie dyfuzyjnych warstw na stopach tytanu np. Ti-6Al-4V
- Uzyskanie zwiększenia odporności na korozję wysokotemperaturową stopów tytanu

Cel naukowy:

- Opis zjawisk dyfuzyjnego narastania warstwy
- Opis mechanizmu korozji wysokotemperaturowej stopów tytanu
- Analiza zjawisk towarzyszących korozji dyfuzyjnych warstw powstających na stopach tytanu

Podzadanie 9cd. POLITECHNIKA WARSZAWSKA

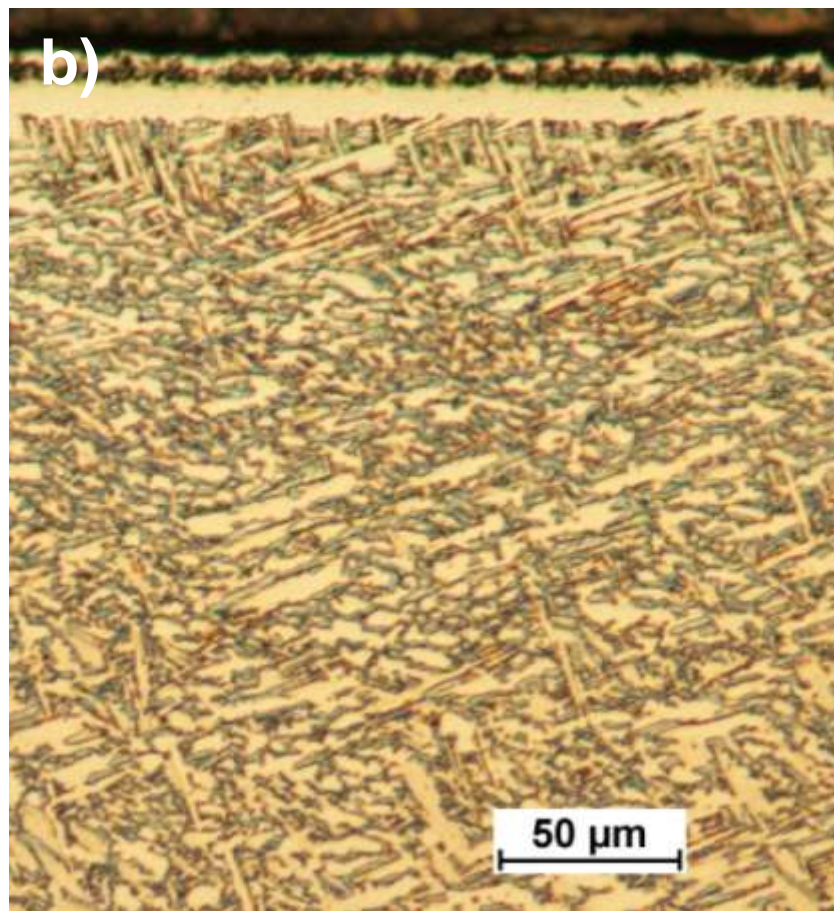
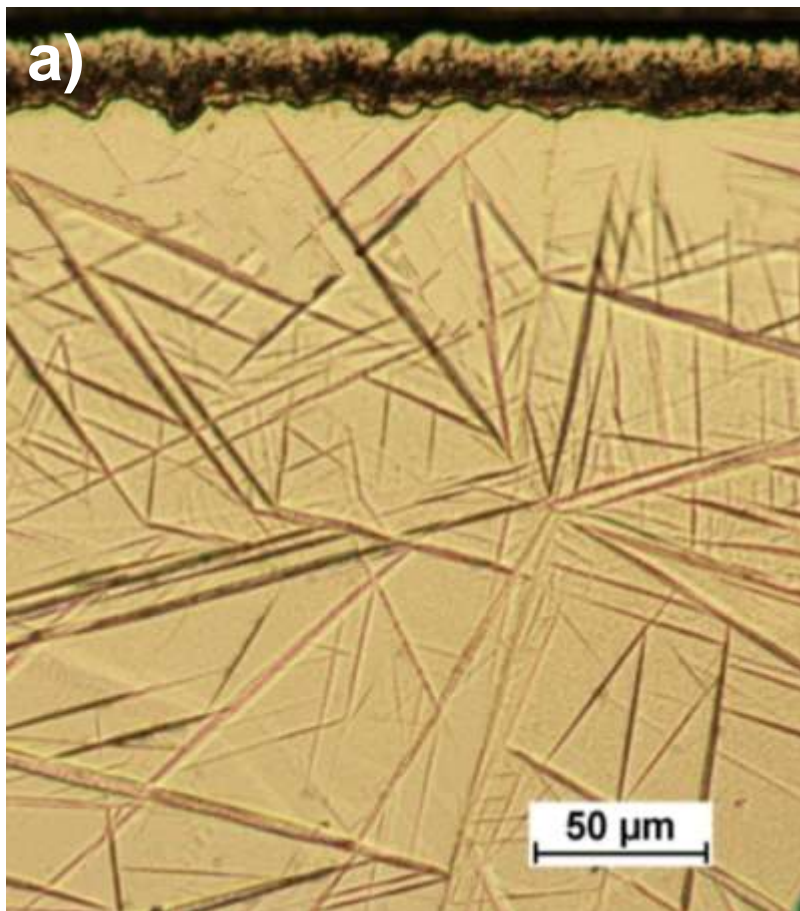
Opracowanie podstaw technologii wytwarzania dyfuzyjnych warstw powierzchniowych zwiększających odporność stopów tytanu na korozję wysokotemperaturową w temperaturze ok. 750°C,

Zakres pracy obejmował:

- wytworzenie dyfuzyjnych warstw międzymetalicznych z układu Ti-Al; na podłożu dwufazowego stopu tytanu Ti6Al4V;
- określenie składu fazowego warstw (Bruker D8);
- określenie mikrostruktury warstw (Nikon Neophot 2);
- określenie składu chemicznego EDS (HITACHI 3500, SU 70);
- badania topografii powierzchni (profilometr skanujący firmy VEECO);
- badania odporności korozyjnej (AutoLab PGSTAT 100);
- badania przyczepności warstw do podłoża (mikro-combi-tester MCT).

Podzadanie 9cd. POLITECHNIKA WARSZAWSKA

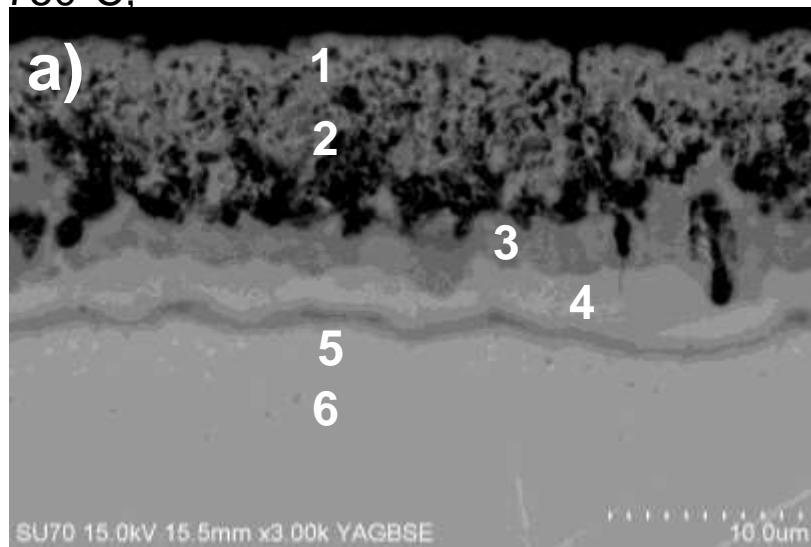
Opracowanie podstaw technologii wytwarzania dyfuzyjnych warstw powierzchniowych zwiększających odporność stopów tytanu na korozję wysokotemperaturową w temperaturze ok. 750°C ,



Mikrostruktury wytworzonych warstw na podłożu tytanu Ti6Al4V po procesie wysoko aktywnego aluminowania w temperaturze 880°C (a), oraz po dodatkowej obróbce cieplnej w piecu próżniowym w temperaturze 880°C (b),

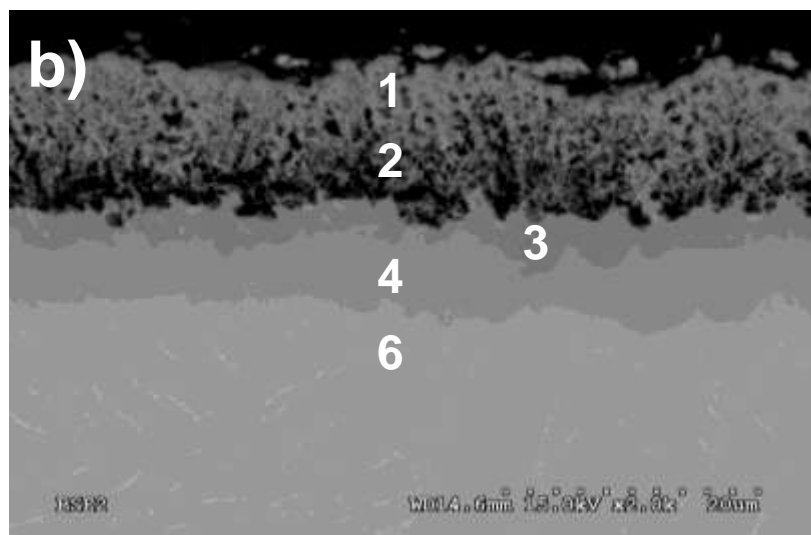
Podzadanie 9cd. POLITECHNIKA WARSZAWSKA

Opracowanie podstaw technologii wytwarzania dyfuzyjnych warstw powierzchniowych zwiększających odporność stopów tytanu na korozję wysokotemperaturową w temperaturze ok. 750°C,



Skład chemiczny warstwy na przekroju poprzecznym, [% mas]

	N-K	Al-K	Ti-K	V-K
1	4.80	20.53	72.22	2.45
2	0.00	32.27	62.06	5.67
3	0.00	37.21	58.65	4.14
4	0.00	15.59	81.89	2.52
5	0.00	6.38	87.98	5.64
6	0.00	6.55	87.38	6.07



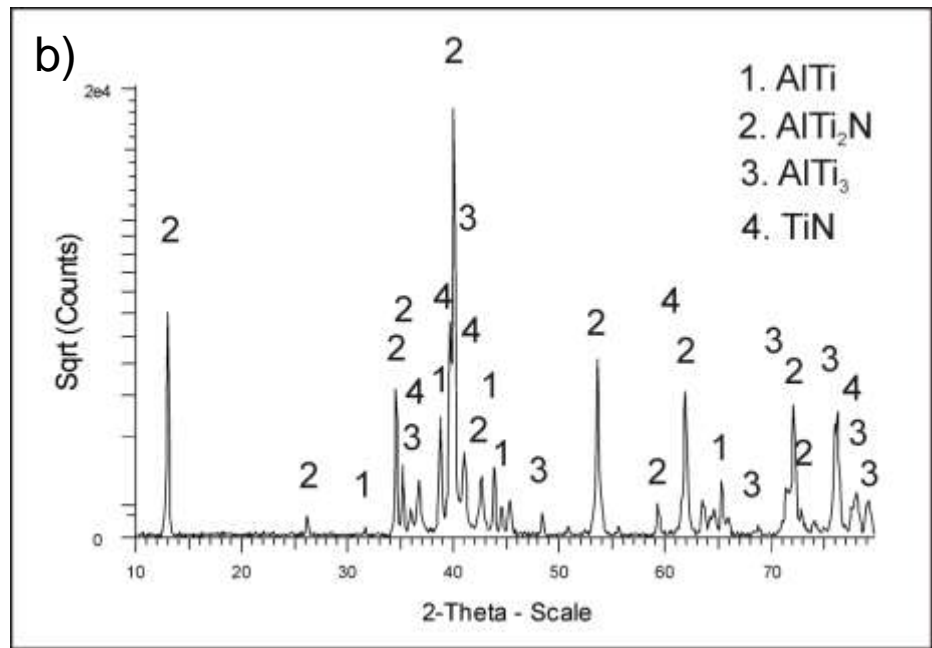
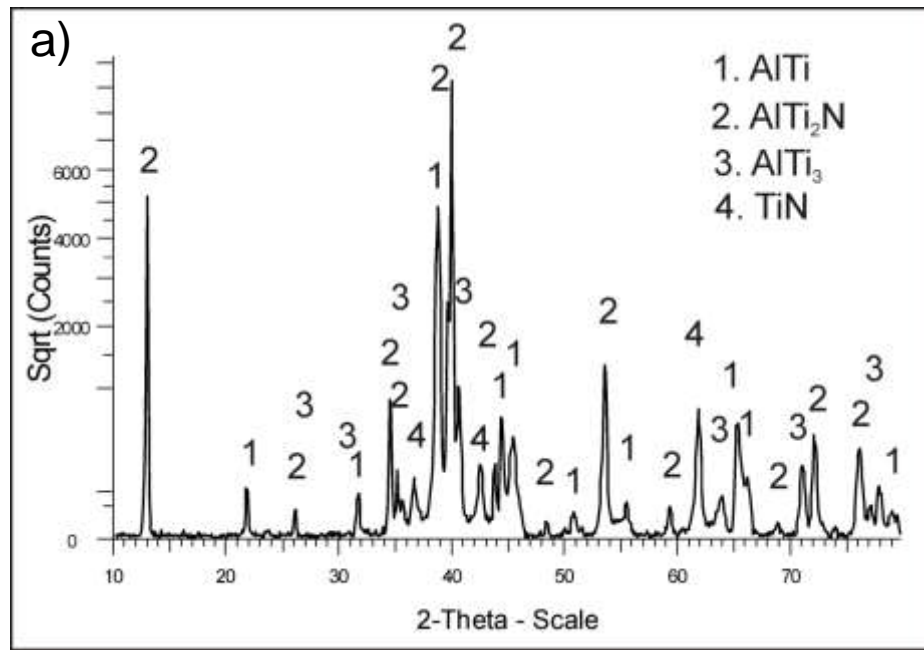
Mikrostruktury wytworzonych warstw na podłożu tytanu Ti6Al4V po procesie aluminowania wysoko aktywnego w temperaturze 880°C (a), po procesie wysoko aktywnego aluminowania i dodatkowej obróbce cieplnej w piecu próżniowym w temperaturze 880°C (b)

Skład chemiczny warstwy na przekroju poprzecznym, [% mas]

	N-K	Al-K	Ti-K	V-K
1	7.20	18.78	58.62	2.05
2	0.00	14.40	73.84	2.02
3	0.00	29.85	58.65	3.59
4	0.00	15.89	74.63	3.12
5	0.00	12.18	80.14	2.40
6	0.00	5.84	79.24	11.04

Podzadanie 9cd. POLITECHNIKA WARSZAWSKA

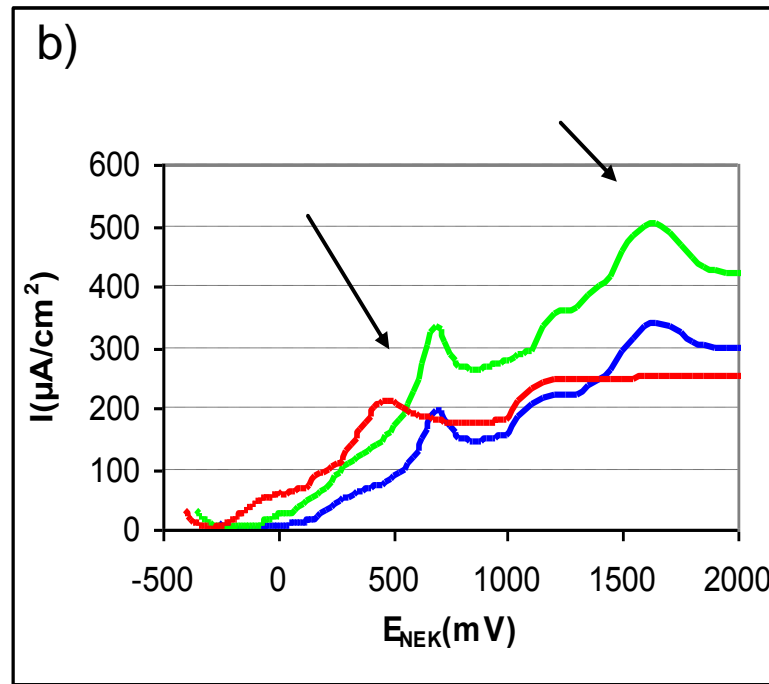
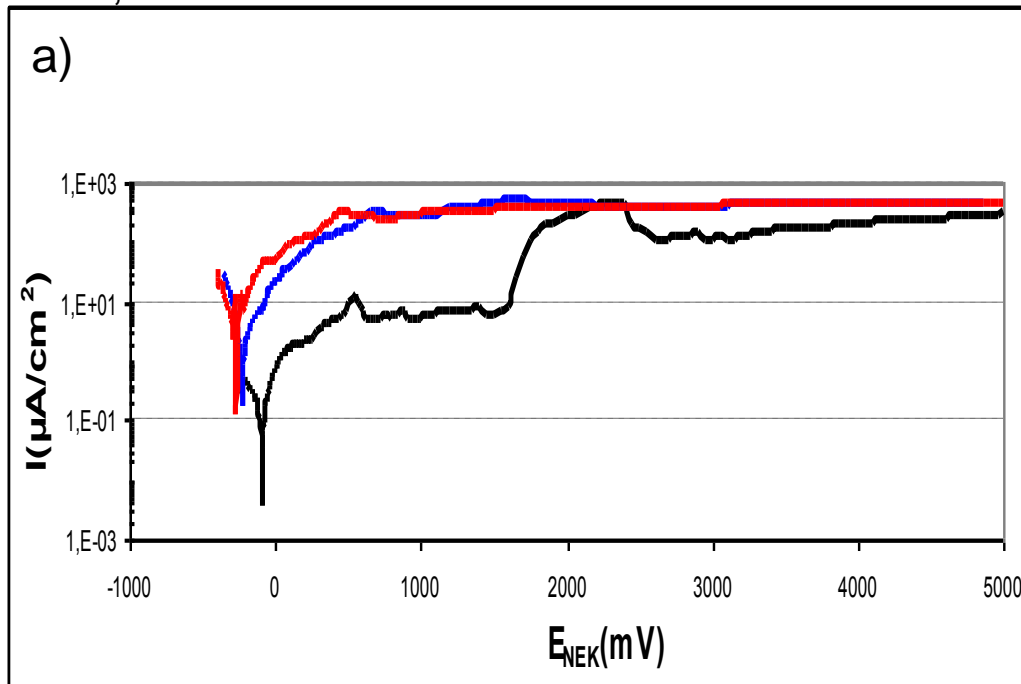
Opracowanie podstaw technologii wytwarzania dyfuzyjnych warstw powierzchniowych zwiększających odporność stopów tytanu na korozję wysokotemperaturową w temperaturze ok. 750°C,



Dyfraktogramy rentgenowskie warstw po procesie aluminowania (a) oraz dodatkowej obróbce cieplnej (b)

Podzadanie 9cd. POLITECHNIKA WARSZAWSKA

Opracowanie podstaw technologii wytwarzania dyfuzyjnych warstw powierzchniowych zwiększających odporność stopów tytanu na korozję wysokotemperaturową w temperaturze ok. 750°C,

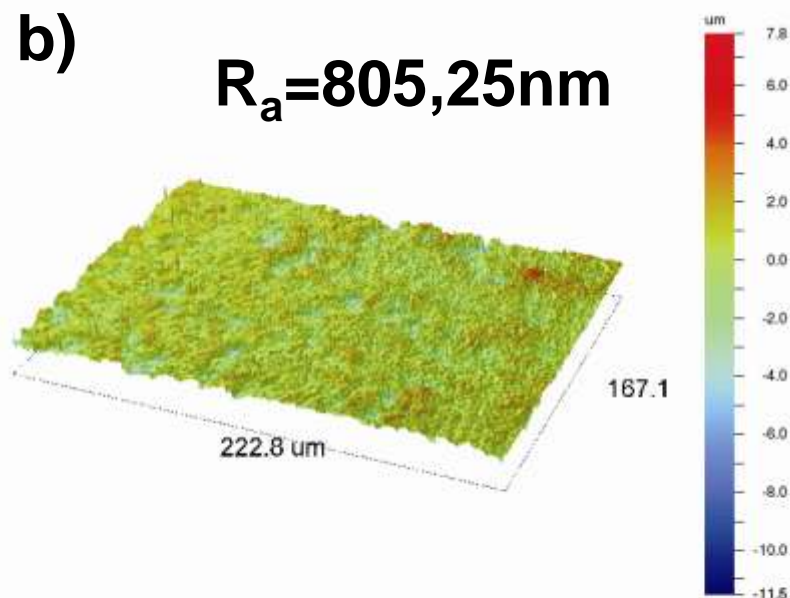
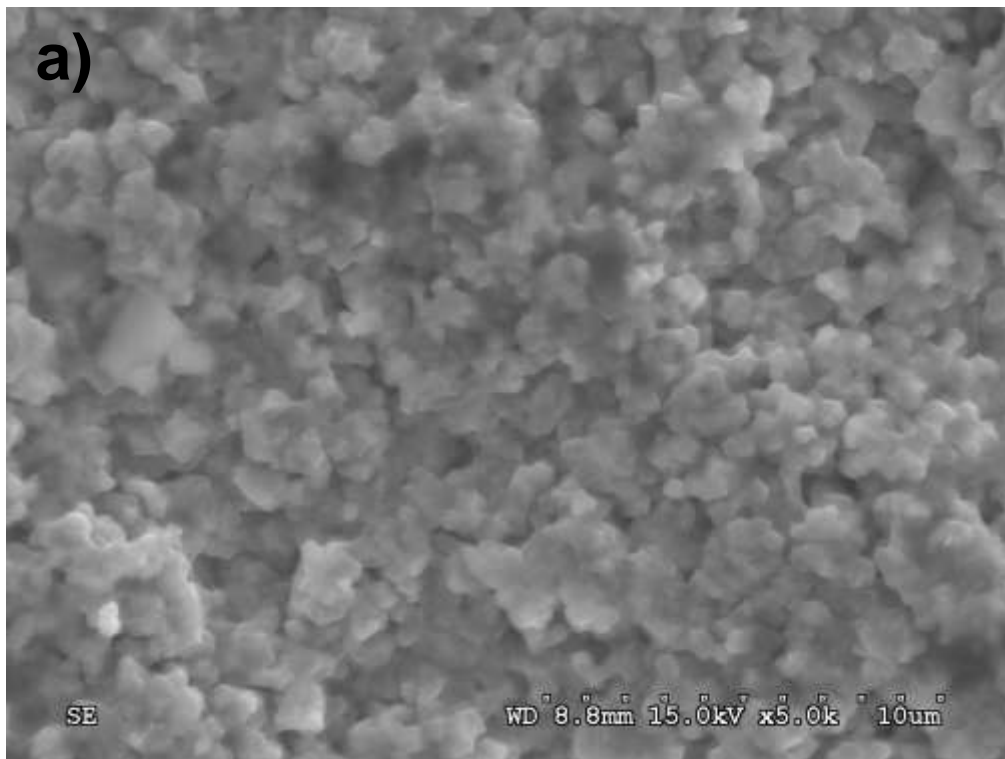


- Stop tytanu Ti6Al4V w stanie wyjściowym
- Stop tytanu Ti6Al4V po procesie aluminowania
- Stop tytanu Ti6Al4V w stanie wyjściowym po procesie aluminowania i obróbce cieplnej w piecu próżniowym
- Stop tytanu Ti6Al4V po procesie aluminowania i 24h ekspozycji

Krzywe potencjodynamiczne badanych materiałów w 0.1M H₂SO₄ w skali logarytmicznej (a) oraz liniowej (b) w celu zobrazowania dodatkowego piku związków aluminium

Podzadanie 9cd. POLITECHNIKA WARSZAWSKA

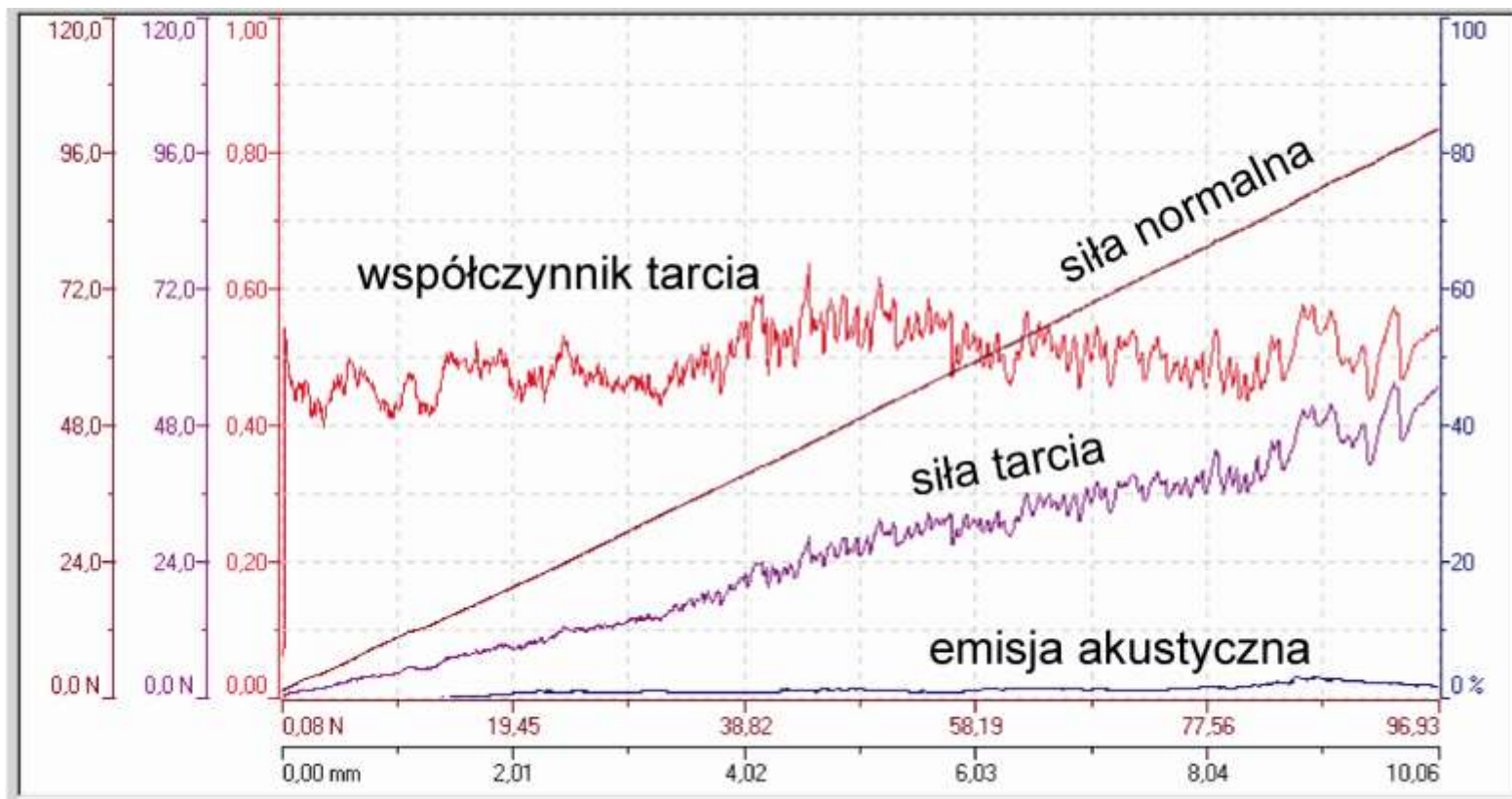
Opracowanie podstaw technologii wytwarzania dyfuzyjnych warstw powierzchniowych zwiększających odporność stopów tytanu na korozję wysokotemperaturową w temperaturze ok. 750°C,



Obraz powierzchni warstwy (a), topografia powierzchni (b) utworzonej w wysoko aktywnym procesie aluminowania w temperaturze 880°C

Podzadanie 9cd. POLITECHNIKA WARSZAWSKA

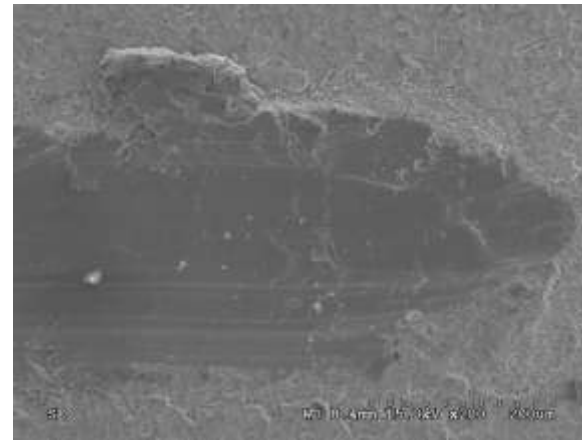
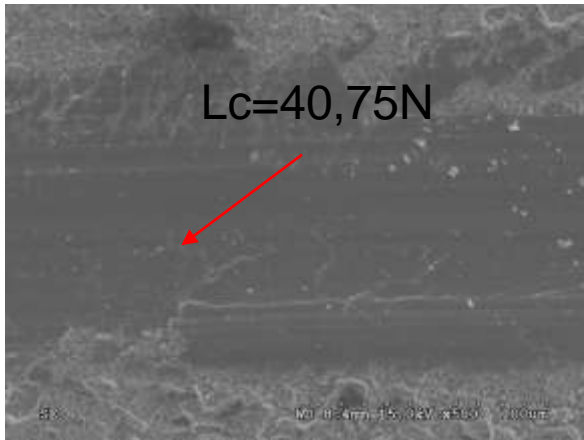
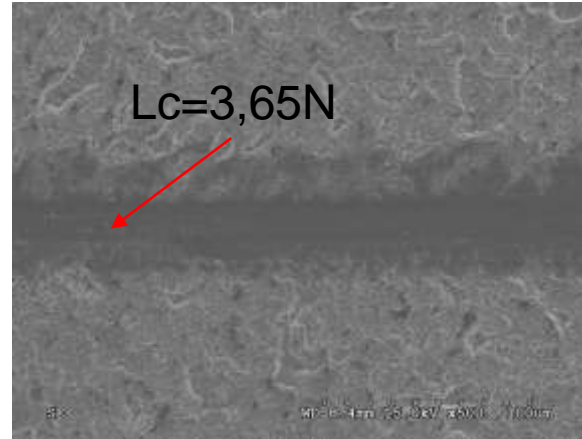
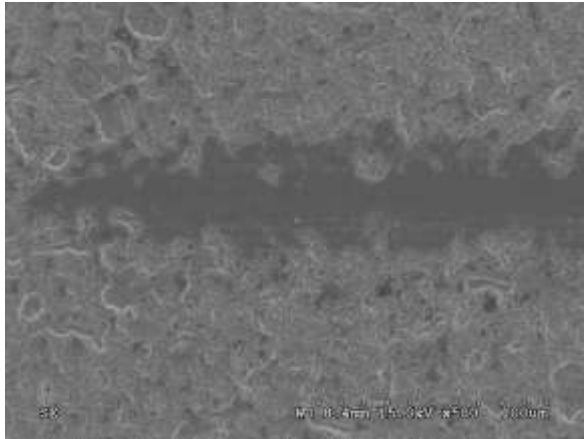
Opracowanie podstaw technologii wytwarzania dyfuzyjnych warstw powierzchniowych zwiększających odporność stopów tytanu na korozję wysokotemperaturową w temperaturze ok. 750°C,



Wykres odporności na zużycie warstwy (scratch-test) po procesie aluminiowania w temperaturze 880°C

Podzadanie 9cd. POLITECHNIKA WARSZAWSKA

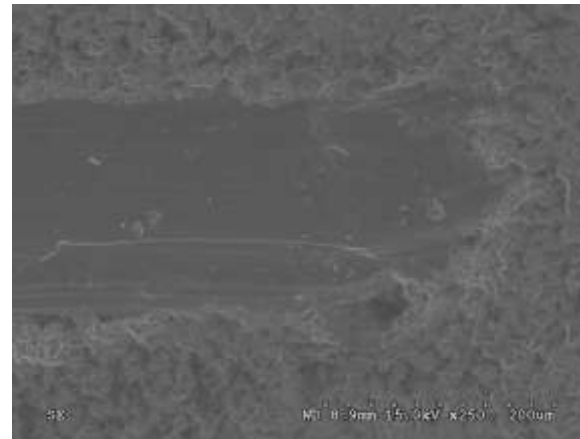
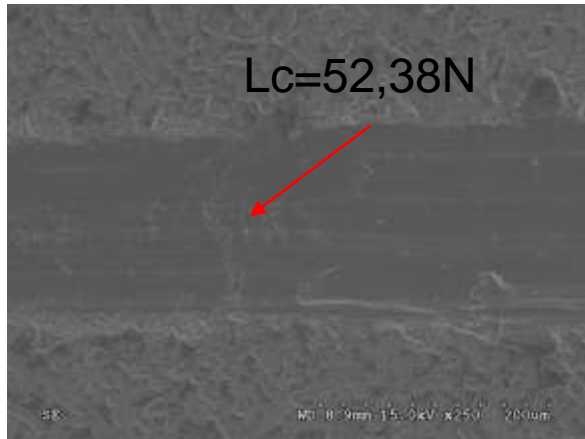
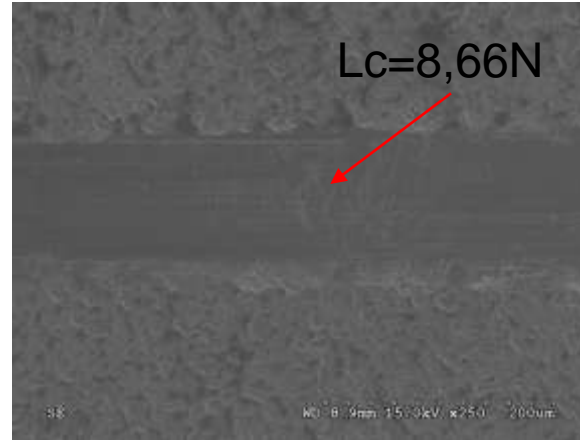
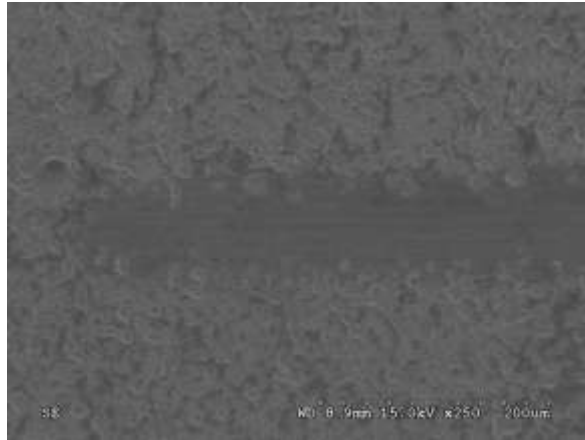
Opracowanie podstaw technologii wytwarzania dyfuzyjnych warstw powierzchniowych zwiększających odporność stopów tytanu na korozję wysokotemperaturową w temperaturze ok. 750°C,



Powierzchnie stopu tytanu Ti6Al4V z warstwą TiAl, Ti₃Al, Ti₂AlN, TiN utworzonych metodą CVD po badaniach przyczepności

Podzadanie 9cd. POLITECHNIKA WARSZAWSKA

Opracowanie podstaw technologii wytwarzania dyfuzyjnych warstw powierzchniowych zwiększających odporność stopów tytanu na korozję wysokotemperaturową w temperaturze ok. 750°C,



Powierzchnie stopu tytanu Ti6Al4V z warstwą TiAl, T₁₃Al, Ti₂AlN, TiN po dodatkowej obróbce cieplnej i badaniach przyczepności



WNIOSKI

- Zastosowanie tróchlorku glinu (AlCl_3) w atmosferze argonu jako gazu nośnego oraz chłodzenie w atmosferze wodoru umożliwia wytworzenie dyfuzyjnej warstwy międzymetalicznej TiAl , Ti_3Al , Ti_2AlN , TiN na podłożu dwufazowego stopu tytanu Ti6Al4V w procesie CVD w temperaturze 880°C ;
- Mikrostruktura stopu tytanu Ti6Al4V po chłodzeniu z temperatury 880°C w atmosferze wodoru (po procesie CVD) składa się z faz martenzytycznych α' (α'');
- Po wyżarzaniu stopu tytanu Ti6Al4V w temperaturze 880°C (w próżni) mikrostruktura składa się z ziarn faz α i β ;
- Otrzymane warstwy są plastyczne, charakteryzują się bardzo dobrą adhezją do podłoża i mogą być wytwarzane na detalach o skomplikowanych kształtach.



WSKAŹNIKI

PUBLIKACJE

9

Zgłoszone

4

Habilitacje

1 w przygotowaniu

Doktoraty

2 otwarte

Doktoraty w przygotowaniu

3 w przygotowaniu

Prace magisterskie

4 w toku realizacji



WSKAŹNIKI

PUBLIKACJE

1. T. Sadowski, L. Marsavina, **Berlin „THERMEC”**; **25-29 sierpnia 2009 SESSION C9: Multiscale Mechanical Modelling Of Complex Materials** „Multiscale Modelling of Gradual Degradation in Al₂O₃/ZrO₂ Ceramic Composites Under Tension”, Lublin University of Technology, Poland Referat jako: „invited paper” artykuł przyjęty do Material Science Forum (koniec listopada – (planowany wydruk), **Pol.Lubelska**
2. T. Sadowski, L.Marsavina, “Multiscale Modelling of Two-phase Ceramic Composites” artykuł w przygotowaniu do Comput. Materials Science (Elsevier – 24 pkt.) **IWCMM’19 (International Workshop on Computational Mechanics of Materials) Constanta, Rumunia, 1 - 4 września 2009** - “General lecture”, **Pol.Lubelska**
3. T.Sadowski, P.Golewski: “**Multidisciplinary analysis of the operational temperature increase of turbine blades in combustion engines by application of the ceramic thermal barrier coatings (TBC)**”, artykuł w recenzji w Computational Materials Science (Elsevier – 24 pkt.) **Pol. Lubelska**
4. R. Sitek, J. Kamiński, P. Sallot, K.J. Kurzydłowski „**STRUCTURE AND PROPERTIES OF IRON ALUMINIDE LAYERS PRODUCED USING CHEMICAL VAPOUR DEPOSITION METHOD ON 316L STEEL**”, artykuł opublikowany w czasopiśmie Materials Science Poland, **Pol. Warszawska**



WSKAŹNIKI

5. G. Moskal: **“Microstructural characteristics and technological properties of YSZ-type powders designed for thermal spraying of TBC”**, Materials Science and Technology, w druku, Pol. Śląska.
6. G. Moskal, A. Rozmysłowska: **“Cracks characterization of YSZ and RE zirconates thermal barrier coatings obtained by APS method”**, Book of Abstracts, E-MRS, E-MRS 2009 Fall Meeting, Warsaw, Poland, 14-18 September 2009, Book of Abstract, 148, Pol. Śląska
7. G. Moskal: **“Characterization of NiCoCrAlY powders and coatings obtained by plasma spraying for TBC applications”**, E-MRS 2009 Fall Meeting, Warsaw, Poland, 14-18 september 2009, Book of Abstract, 146, Pol. Śląska
8. G. Moskal: **“Wpływ metody wytwarzania na mikrostrukturę i właściwości proszków typu $ZrO_2 \cdot xY_2O_3$ ”**, XXXVII Szkoła Inżynierii Materiałowej, Kraków-Krynica, 29.IX-2.10.2009, 347- 352, Pol. Śląska
9. G. Moskal, A. Rozmysłowska, A. Gazda, M. Homa: **„Wybrane własności cieplne proszków cyrkonianowych na bazie pierwiastków ziem rzadkich typu $RE_2Zr_2O_7$ (RE- Gd, La, Sm, Nd) przeznaczone do natryskiwania cieplnego powłokowych warstw barierowych”** Archiwum Odlewnictwa – w druku, Pol. Śląska.

WSKAŹNIKI

Publikacje zgłoszone i przygotowywane

Superalloys 2010

G.Moskal, L. Swadźba: “ Charakterystyka własności cieplnych mieszanin proszków typu $Gd_2Zr_2O_7 - ZrO_2xY_2O_3$ przeznaczonych do natryskiwania warstw gradientowych typu TBC”

AMT 2010, Pol. Śląska

G.Moskal, L. Swadźba: “Powłoki gradientowe TBC typu $RE_2Zr_2O_7- ZrO_2xY_2O_3$ ”, **Pol.Śląska**

G.Moskal, L. Swadźba: “Dyfuzyjność cieplna powłok gradientowych TBC typu $RE_2Zr_2O_7- ZrO_2xY_2O_3$ ”, **Pol. Śląska**

mat konferencyjne: 19 XXXVI Szkoła Inżynierii Materiałowej Kraków-Krynica 29 IX – 2 X 2009. „**WŁAŚCIWOŚCI UŻYTKOWE WARSTWY ALUMINIDKOWEJ WYTWORZONEJ W PROCESIE CVD NA NADSTOPIE NIKLU INCONEL 713 LC**”

M. Yaworska, J. Sieniawski

Publikacje w druku :

Archives of Metallurgy and Materials „**FUNCTIONAL PROPERTIES OF ALUMINIDE LAYER DEPOSITED ON INCONEL 713 LC NI-BASED SUPERALLOY IN THE CVD PROCESS**”, M.Yavorska, J.Sieniawski



WSKAŹNIKI

Prace habilitacyjne

1. Dr inż. Grzegorz Moskal - w toku realizacji

Prace doktorskie

1. Mgr P. Golewski: „Modelowanie fizyczne powłokowej bariery cieplnej z uwzględnieniem właściwości materiału i warunków pracy oraz procesów degradacji” Pol. Lubelska.

2. Mgr inż. Bartosz Witala, I rok studia doktoranckie otwarcie doktoratu 2010/2011, Pol. Śląska.

3. Planowane otwarcie 2 doktoratów w latach 2010-2011 Pol. Śląska.

4. Marek Poręba „Wysoko-niskoaktywne procesy wytwarzania warstw żaroodpornych na stopie niklu Rene 77 metodą CVD” Politechnika Rzeszowska Promotor prof. dr hab. inż. Jan Sieniawski (w trakcie realizacji).

Prace magisterskie

4 prace magisterskie – Pol. Śl. 3. Pol. Rzeszowska 1

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