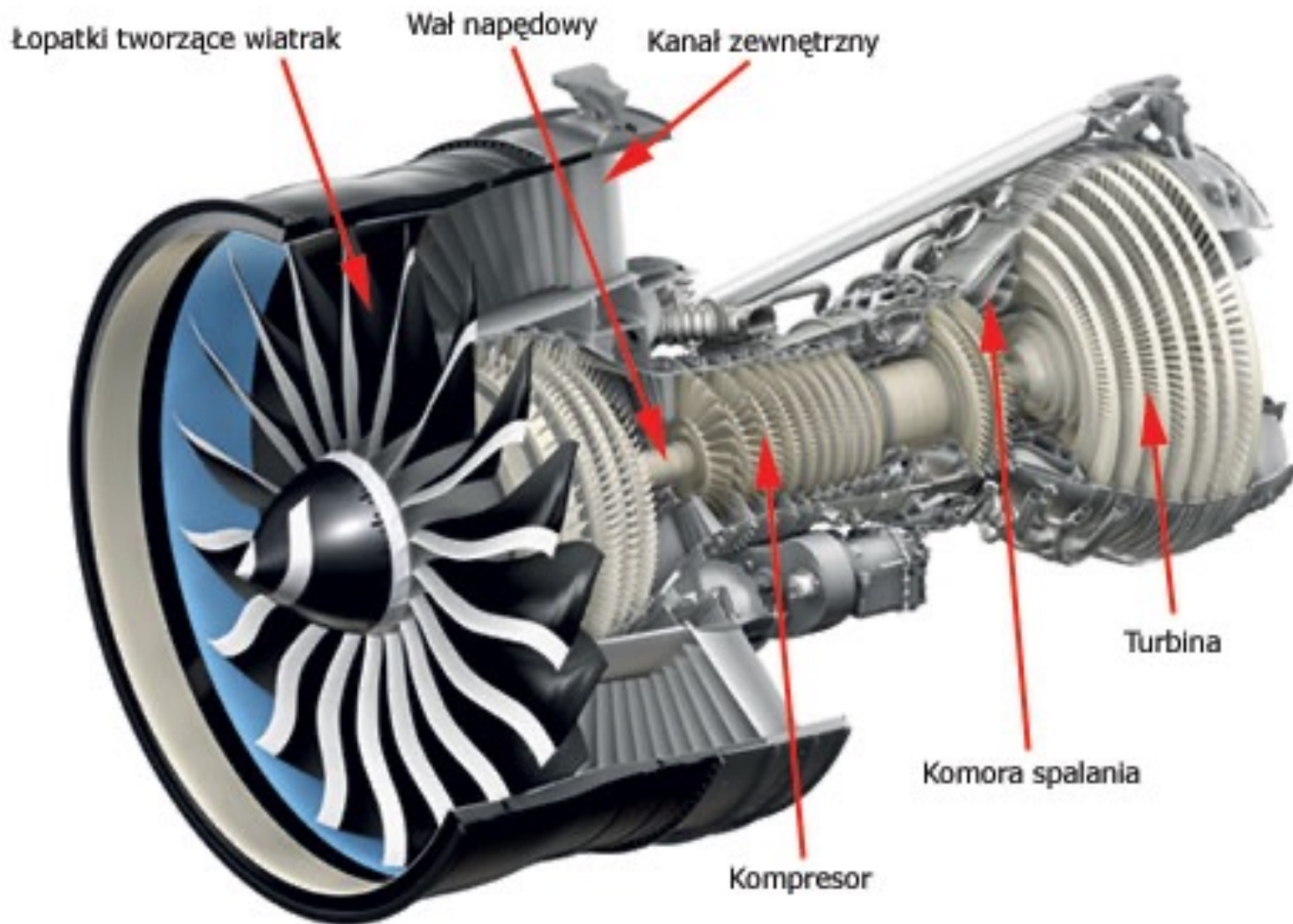




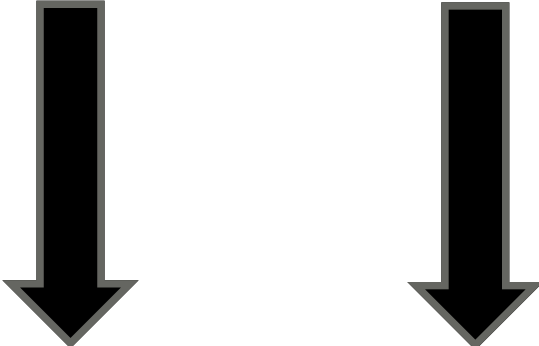
**POWŁOKOWE BARIERY  
CIEPLNE  
W TECHNICIE LOTNICZEJ**

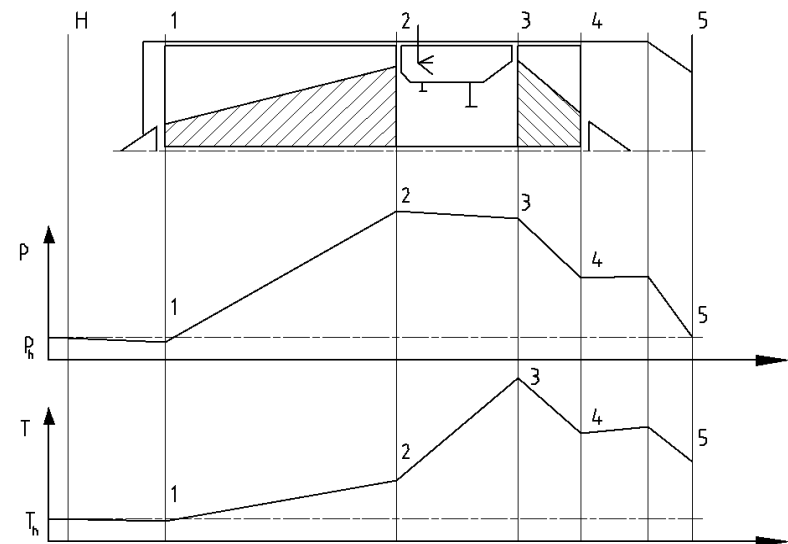
# *Budowa silnika turbowentylatorowego*



# Mechanizmy niszczące łopatki turbiny

- Obciążenia mechaniczne
- Obciążenia cieplne
- Działanie lokalnego środowiska spalin
  - *wysoka temperatura,*
  - *obecność spalin zawierających sole i zanieczyszczenia*

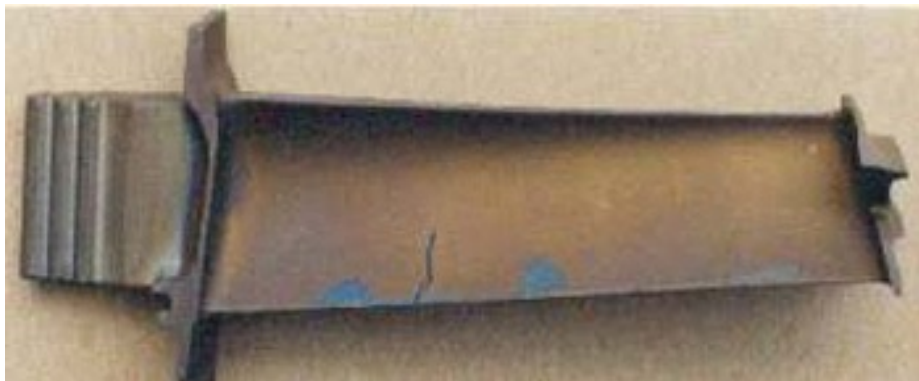
  
**Utlenianie    Hot Corrosion**



# Utlenianie i Hot corrosion

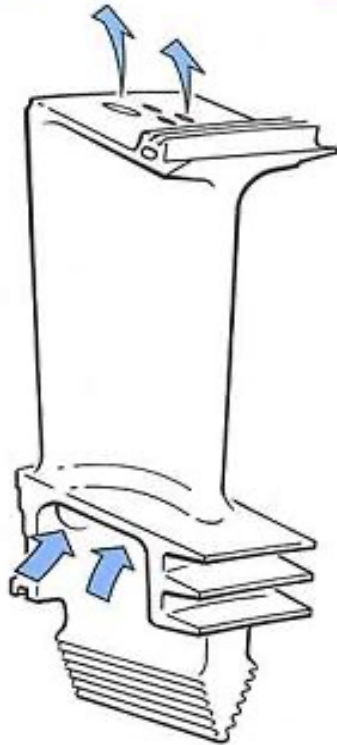
**Utlenianie**- korozja gazowa zachodząca w środowisku zawierającym jedynie suchy gaz (tlen, azot, związki siarki, spaliny). Jest najczęstszym przykładem korozji chemicznej występującej w środowisku, gdzie materiał narażony jest działanie gorących par i gazów.

**Hot corrosion**- rodzaj przyspieszonej korozji, zachodzący w obecności soli, zanieczyszczeń takich jak np.  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5$ , które w połączeniu tworzą ciekłe osady niszczące ochronne warstwy tlenków. Ta forma korozji może w przeciwieństwie do utleniania zniszczyć materiał w bardzo szybkim tempie.



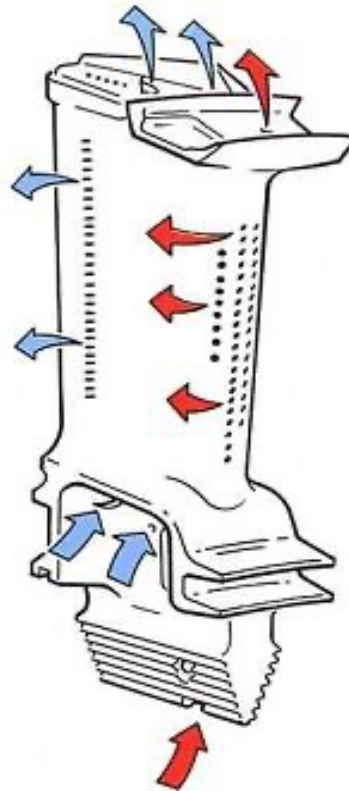
# Rozwój konstrukcji łopatek turbin

■ L.P. cooling air    ■ H.P. cooling air



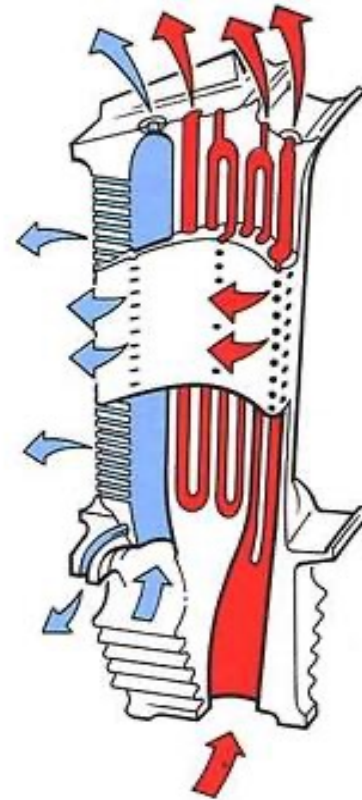
SINGLE PASS,  
INTERNAL COOLING  
(1960's)

SINGLE PASS,  
INTERNAL COOLING  
(1960's)



SINGLE PASS,  
MULTI-FEED  
INTERNAL COOLING  
WITH FILM COOLING  
(1970's)

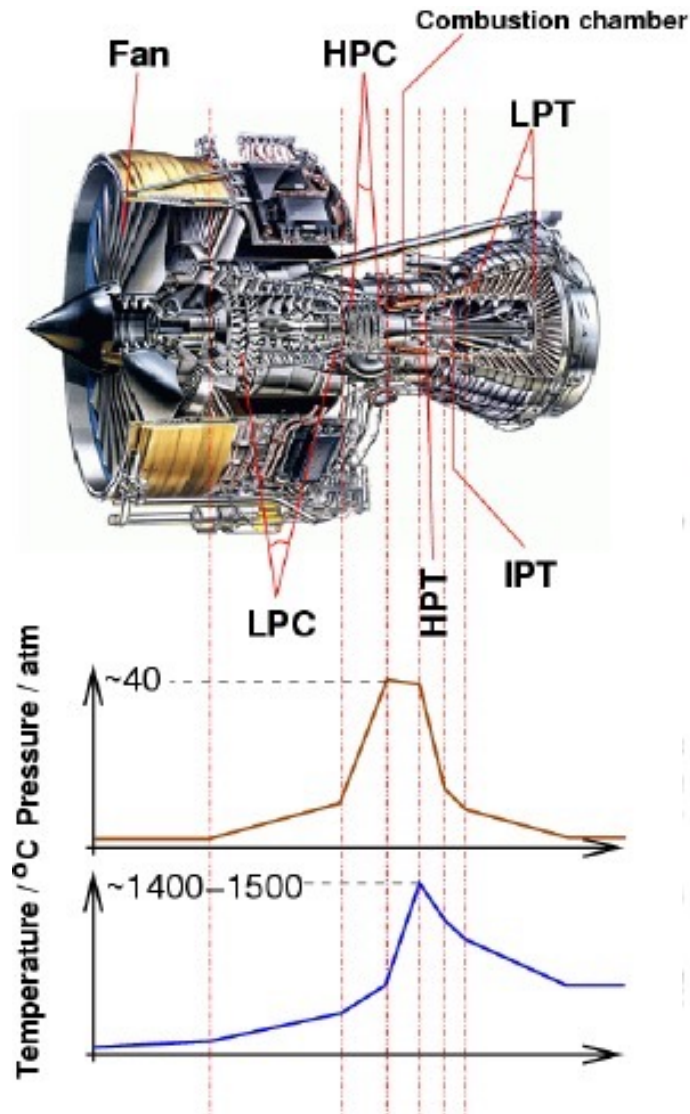
SINGLE PASS,  
MULTI-FEED  
INTERNAL COOLING  
WITH FILM COOLING  
(1970's)



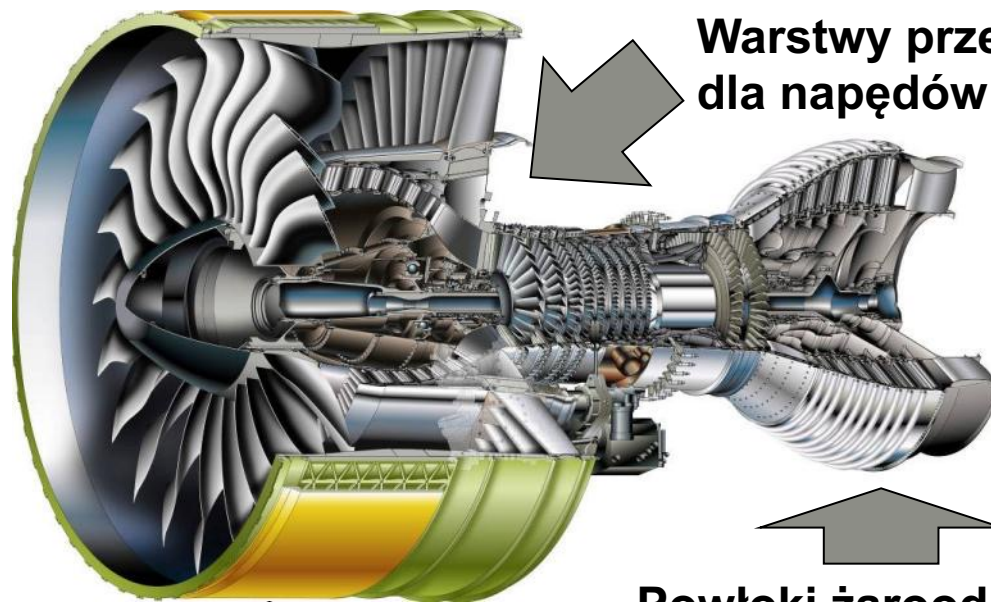
QUINTUPLE PASS,  
MULTI-FEED  
INTERNAL COOLING  
WITH EXTENSIVE  
FILM COOLING

QUINTUPLE PASS,  
MULTI-FEED  
INTERNAL COOLING  
WITH EXTENSIVE  
FILM COOLING

# *Rozkład temperatury i ciśnienia na przekroju współczesnego silnika turbowentylatorowego*



# ***Powłoki i warstwy ochronne stosowane w silnikach lotniczych***

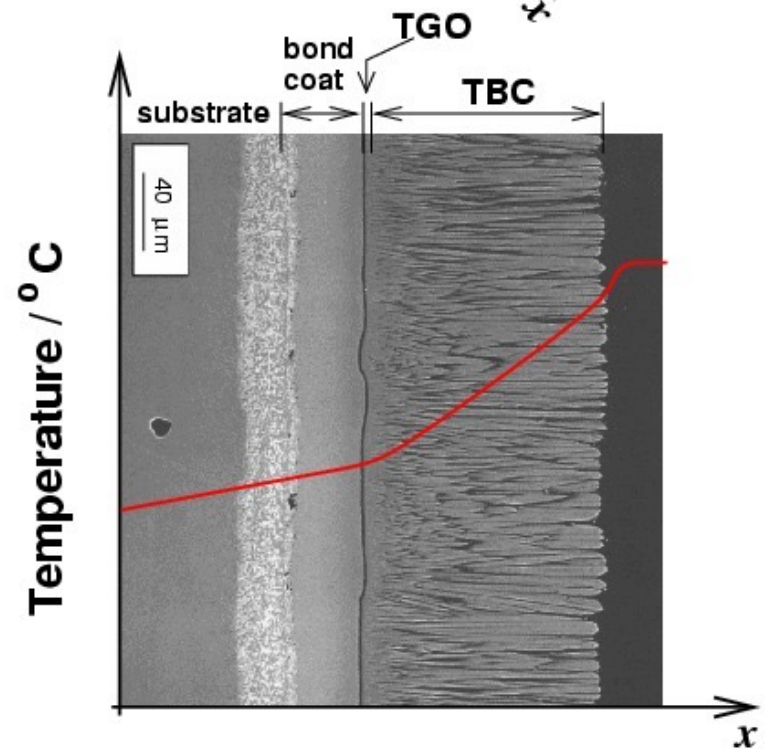
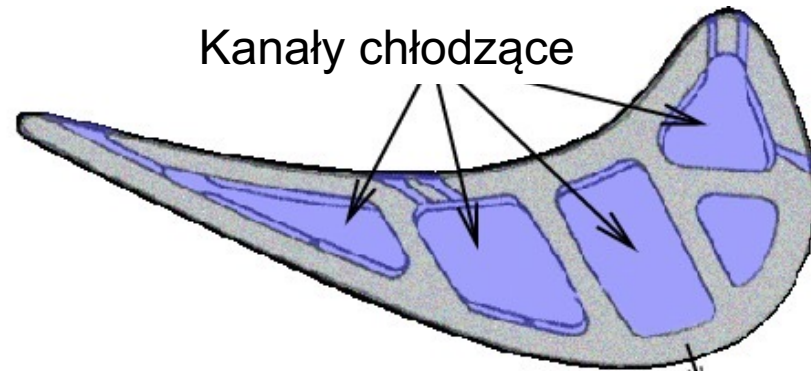


**Warstwy przeciwzużyciowe dla napędów lotniczych**

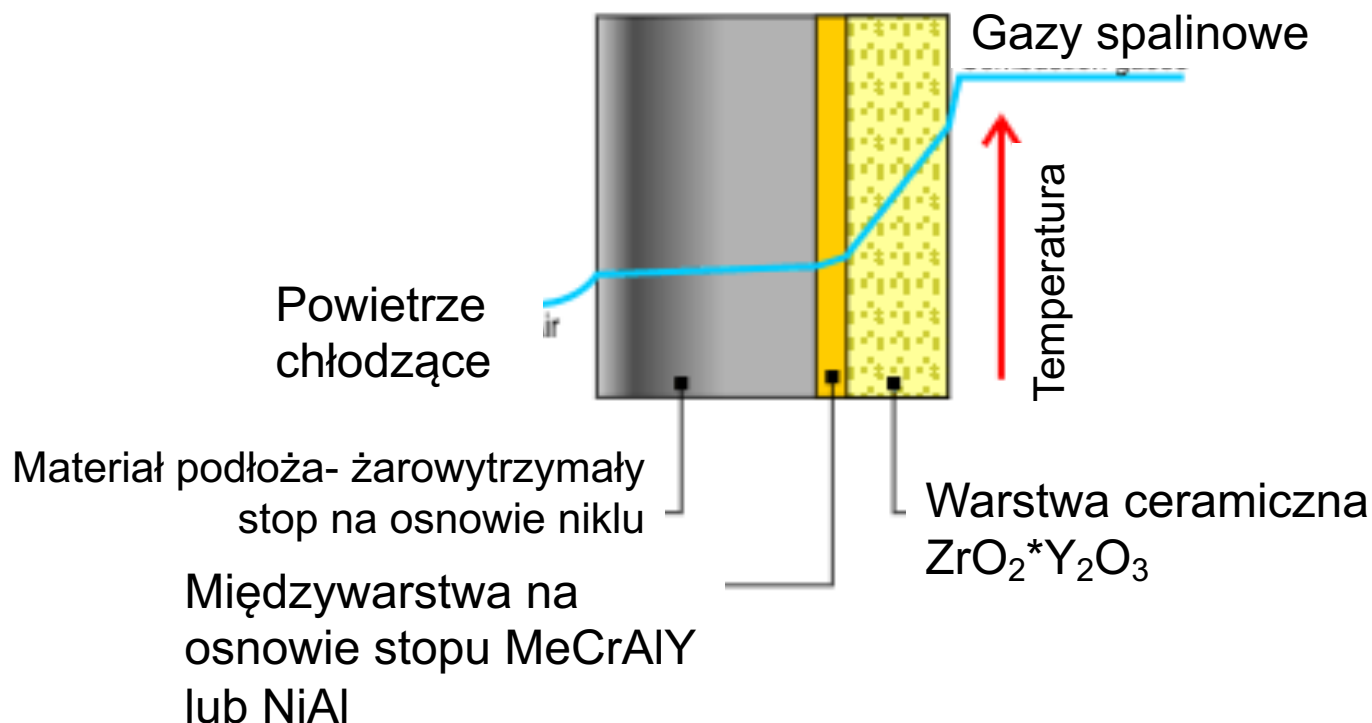
**Powłoki odporne na erozję i korozję na elementy sprężarki silnika lotniczego**

**Powłoki żaroodporne na elementach części gorącej: powłokowe bariery cieplne, warstwy aluminiidkowe**

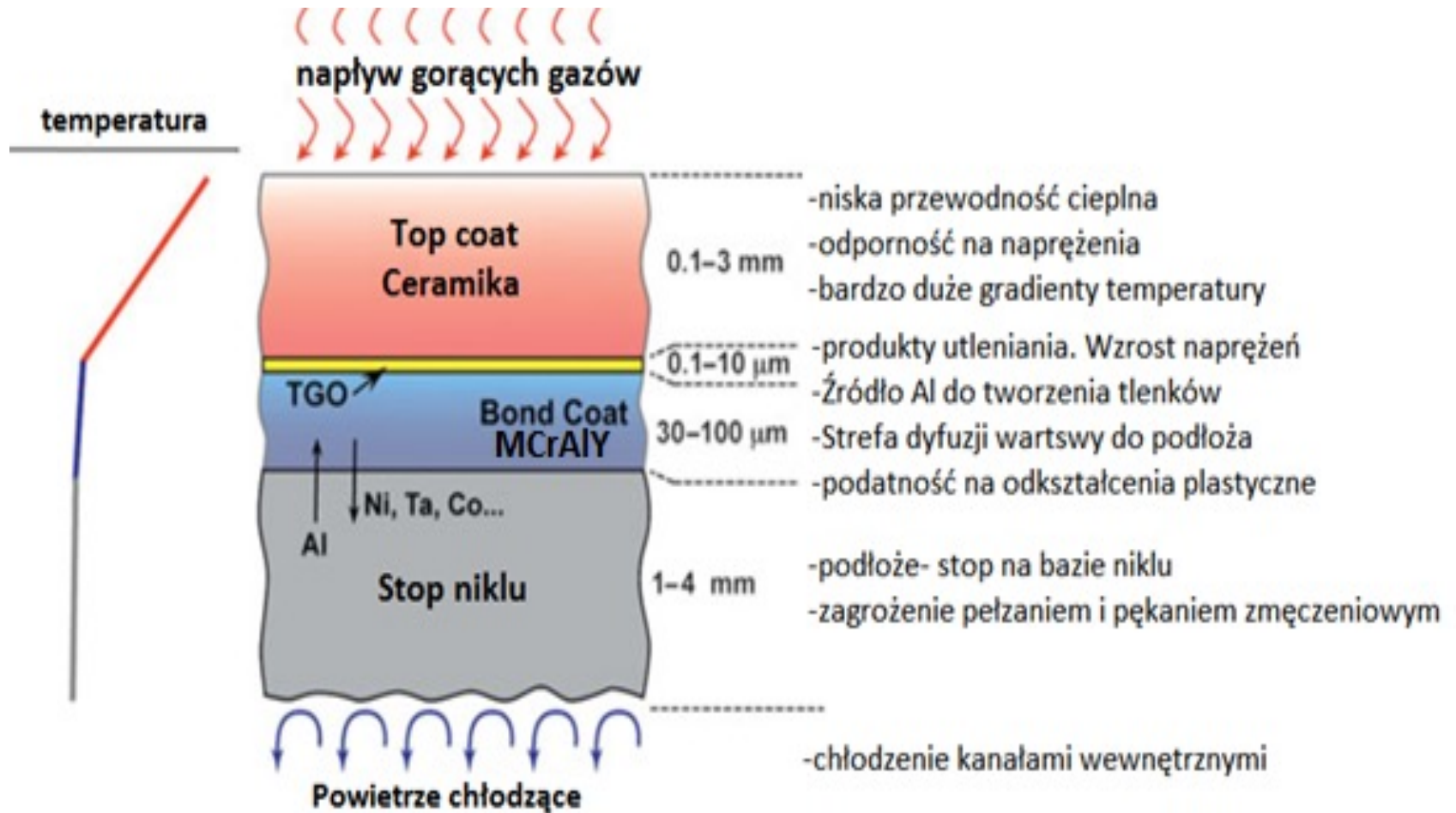
# Łopatką turbiny z powłoką TBC



# Przekrój łopatkki z powłoką TBC



# Budowa powłokowej bariery cieplnej TBC



# Powłoka TBC



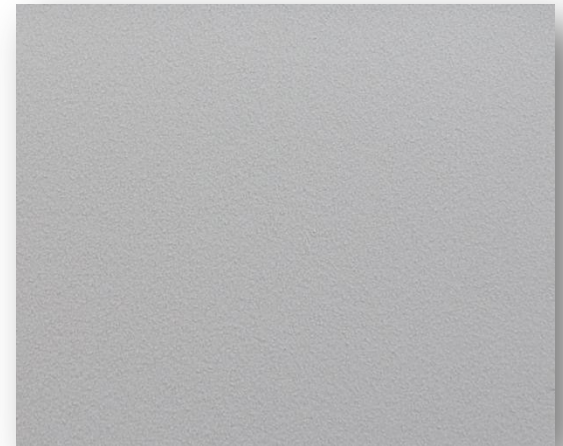
Podłoże – stop IN 713



NiCoCrAlY bond coat -  
LPPS, proszek Amdry 997

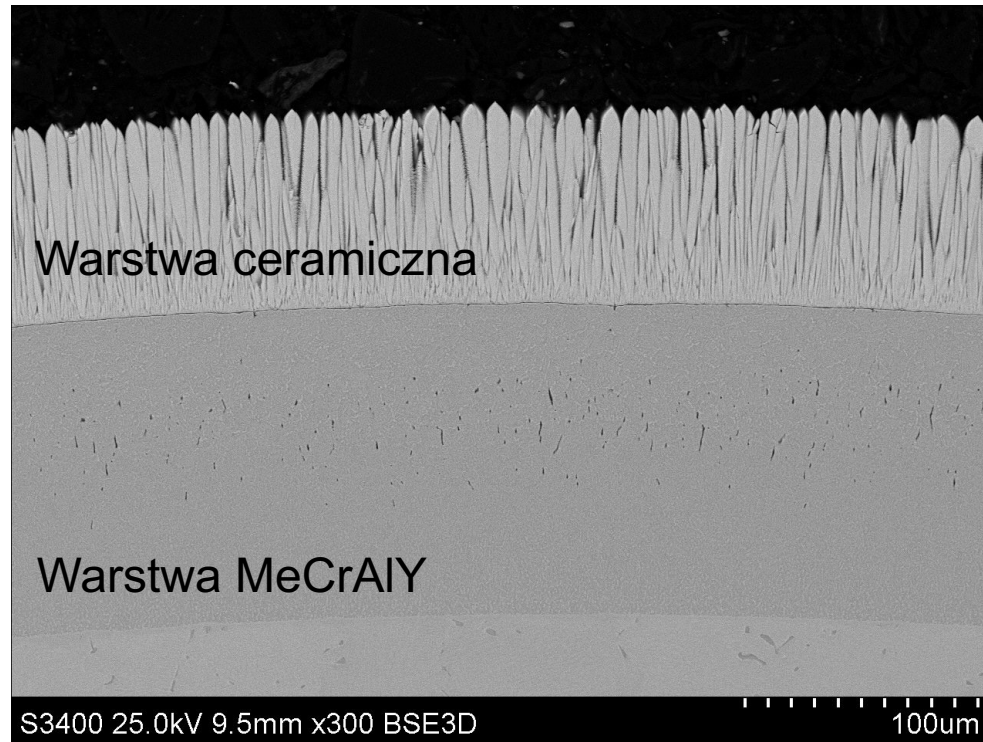


YSZ top coat - **EB-PVD**



***METODA FIZYCZNEGO  
OSADZANIA Z FAZY  
GAZOWEJ Z  
ODPAROWANIEM ZA  
POMOCAŃ PALNIKA  
PLAZMOWEGO  
PLASMA SPRAY – PHYSICAL  
VAPOUR DEPOSITION***

# ***Mikrostruktura warstwy TBC wytworzonej metodą EB-PVD***



## ***Metody wytwarzania zewnętrznej warstwy ceramicznej powłokowej bariery cieplnej na podłożu łopatek turbin***

- ❖ Natryskiwanie plazmowe w warunkach ciśnienia atmosferycznego
- ❖ Fizyczne osadzanie z fazy gazowej z odparowaniem za pomocą wiązki elektronów EB-PVD

# ***Urządzenie do wytwarzania warstwy ceramicznej powłokowej bariery cieplnej metodą EB-PVD***



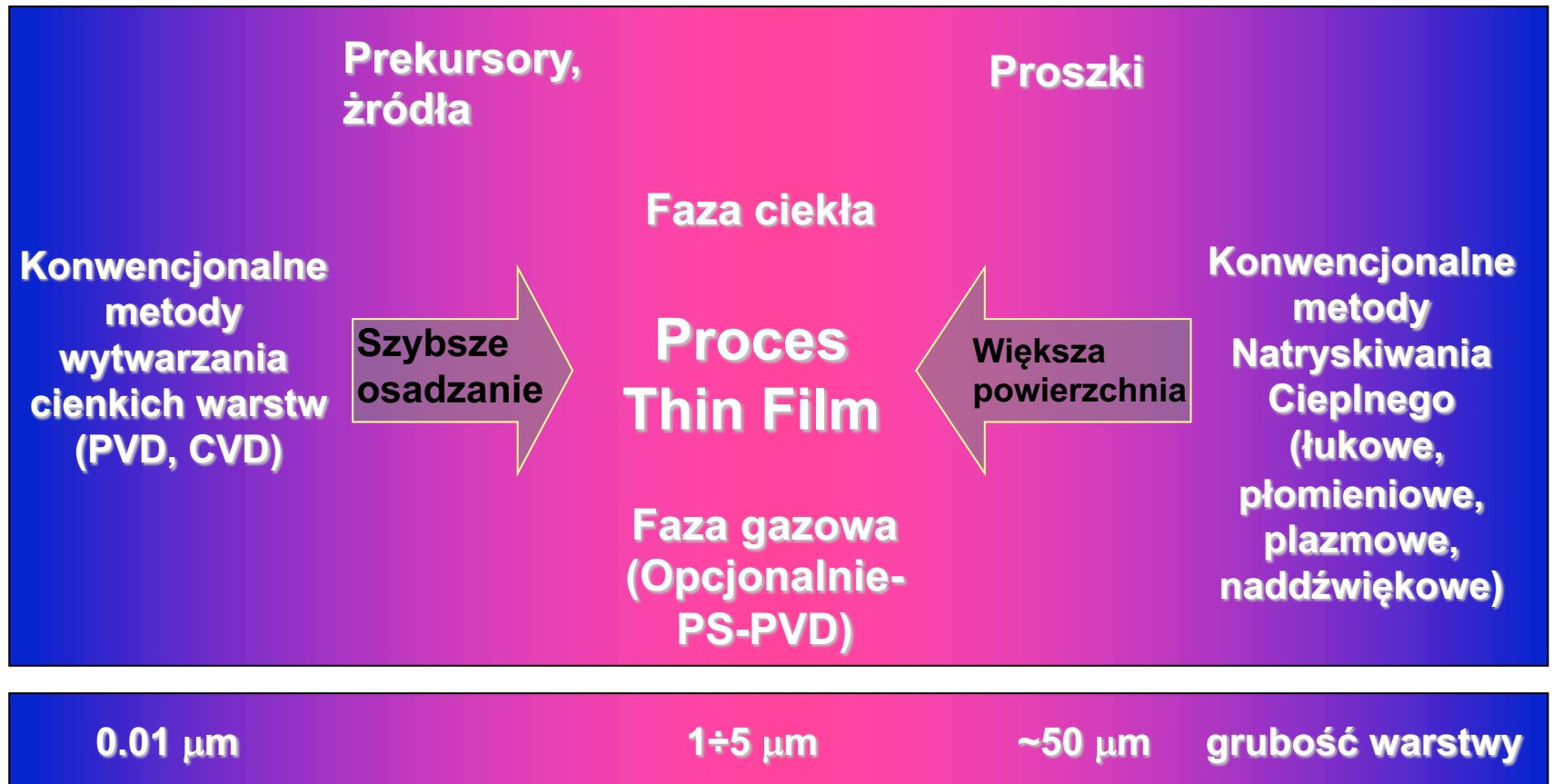
# ***Metody wytwarzania międzywarstwy dla powłokowych barier cieplnych***

- ❖ Warstwy aluminiidkowe wytwarzane metodą gazową (VPA)
- ❖ Warstwy aluminiidkowe modyfikowane krzemem cyrkonem, hafnem, chromem - CVD
- ❖ Warstwy aluminiidkowe modyfikowane platyną lub palladem-CVD
- ❖ Nowe rodzaje warstw typu MCrAlY –LPPS/APS

## ***Nowe metody wytwarzania powłok w procesach natryskiwania cieplnego w warunkach niskiego ciśnienia***

- ❖ ***THIN FILM*** – możliwość wytwarzania warstw natryskiwanych plazmowo w warunkach niskiego ciśnienia (poniżej 3 kPa) o grubości  $>5-20 \mu\text{m}$
- ❖ ***PS-PVD*** – Plasma Spray-Physical Vapour Deposition – proces natryskiwania plazmowego w warunkach niskiego ciśnienia (50-200 Pa) z odparowaniem cząstek materiału (w tym ceramicznego) – **MOŻLIWOŚĆ UZYSKANIA WARSTW CERAMICZNYCH O BUDOWIE KOLUMNOWEJ (EB-PVD)**

# Koncepcja metod LPPS-Thin Film oraz PS-PVD



# ***Warunki prowadzenia procesu na urządzeniu LPPS-THIN FILM:***

- ❖ moc palnika do 180 kW
- ❖ natężenie przepływu gazu do 200 dm<sup>3</sup>/min (argon, hel, wodór, azot)
- ❖ możliwość wprowadzania dwóch rodzajów proszku w jednym procesie w tym drobnoziarnistych
- ❖ możliwość wprowadzania tlenu do komory roboczej
- ❖ nakładanie warstw na elementach o różnym kształcie i rozmiarach np. łopatki turbin
- ❖ strumień plazmy - średnica 200-400 mm, długość do 2000 mm
- ❖ prędkość wzrostu warstwy – ponad 100 mm/min

# ***Palniki stosowane w metodzie LPPS- Thin Film oraz PS-PVD***

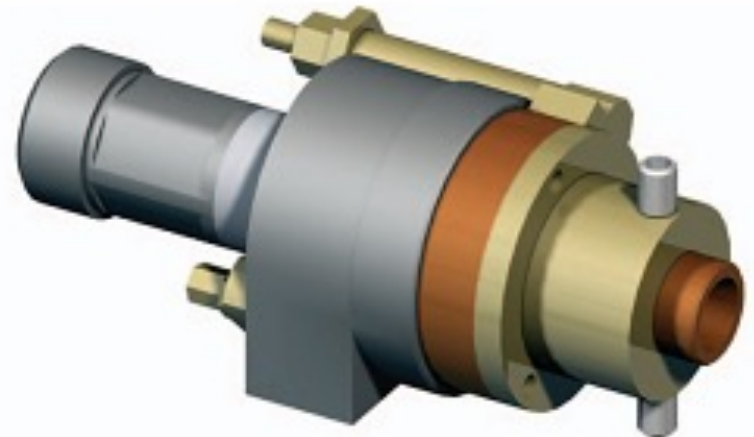
***Konwencjonalny palnik  
APS/LPPS***

***Moc 50 kW***



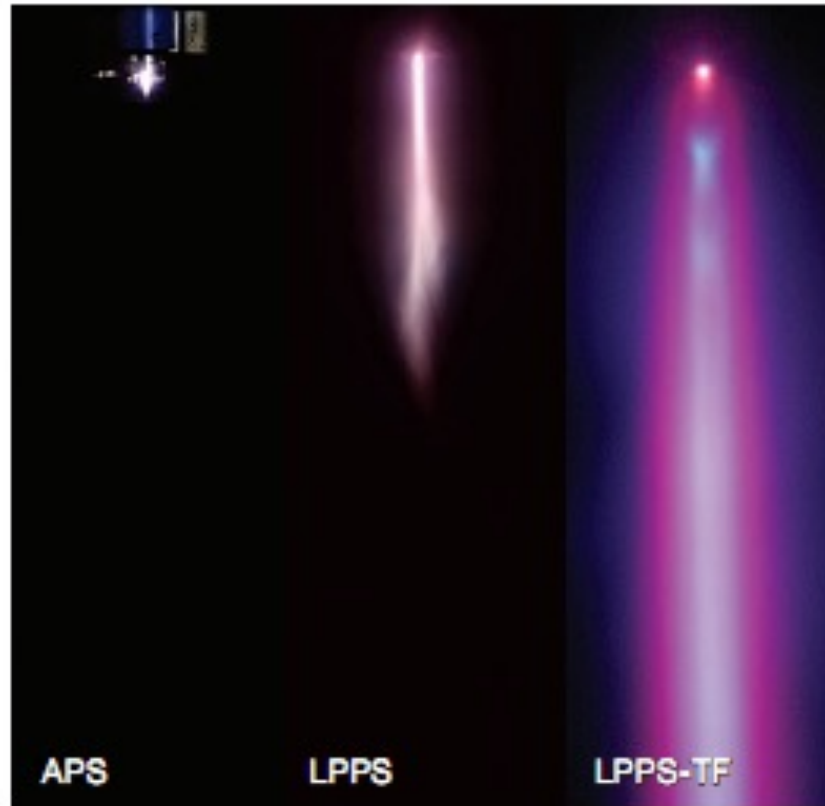
***Wysokoenergetyczny palnik  
LPPS/LPPS-TF/PS-PVD***

***Moc 180 kW***

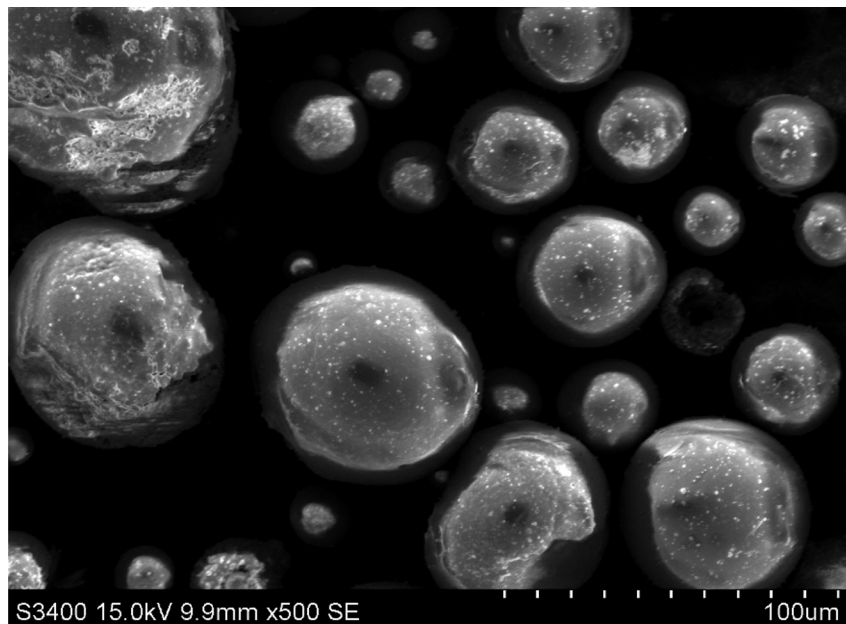


# ***Nowe możliwości natryskiwania metodami LPPS-THIN FILM i PS-PVD***

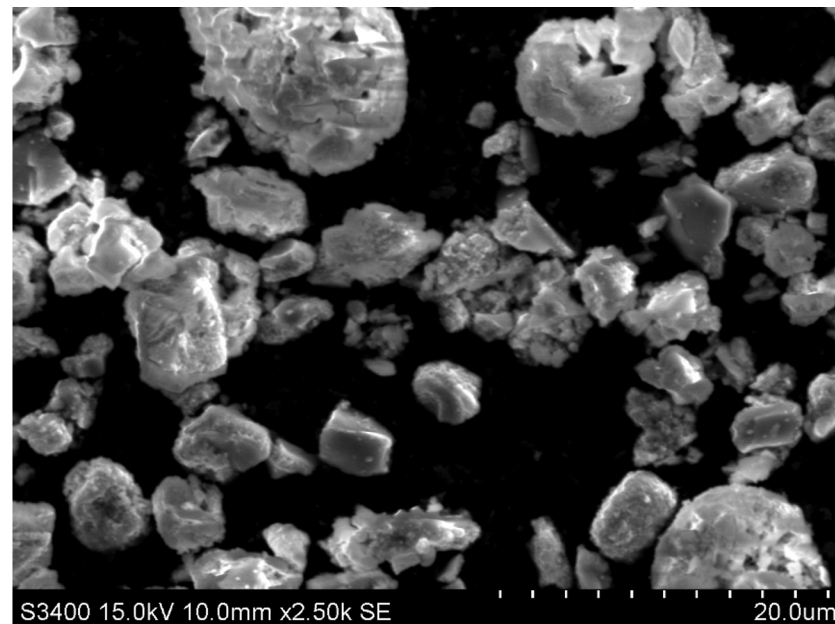
***Strumień plazmy w procesach natryskiwania***



# ***Nowe możliwości natryskiwania metodami LPPS-THIN FILM i PS-PVD***



***Proszek  $ZrO_2 \cdot 8Y_2O_3$   
stosowany do wytwarzania warstw  
ceramicznych metodą APS/LPPS  
(Metco 204)***



***Proszek  $ZrO_2 \cdot 7.5Y_2O_3$   
stosowany do wytwarzania warstw  
ceramicznych metodą LPPS-TF oraz  
PS-PVD (Metco 6700)***

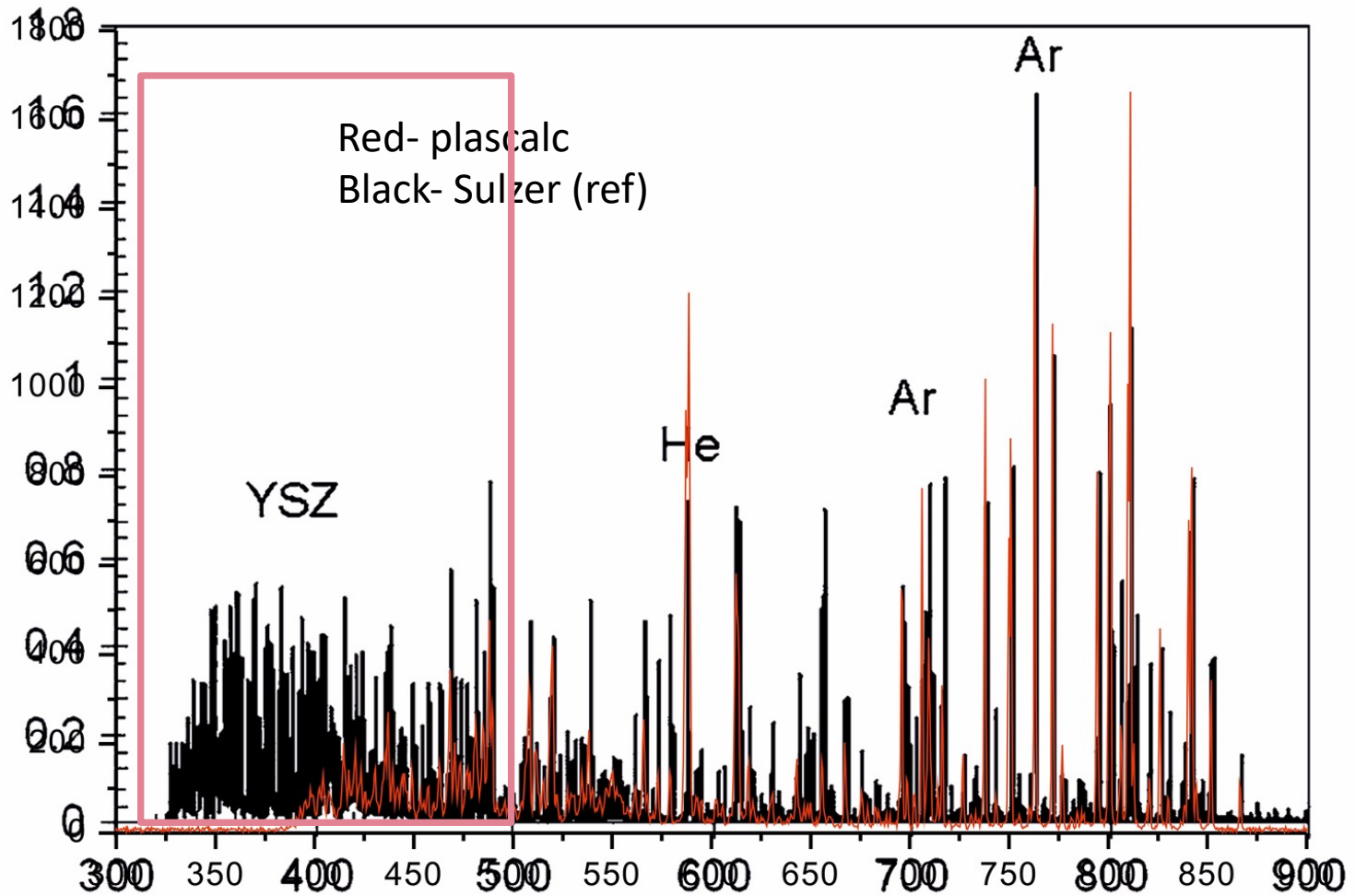
# ***Warstwy żadooprone wytwarzane metodą PS-PVD***

- ❖ międzywarstwy na osnowie wieloskładnikowego stopu typu MeCrAlY
  - mała porowatość
- ❖ warstwy ceramiczne tlenku cyrkonu stabilizowanego tlenkiem itru o budowie warstwowej i kolumnowej (z odparowaniem proszku – proces PS-PVD)

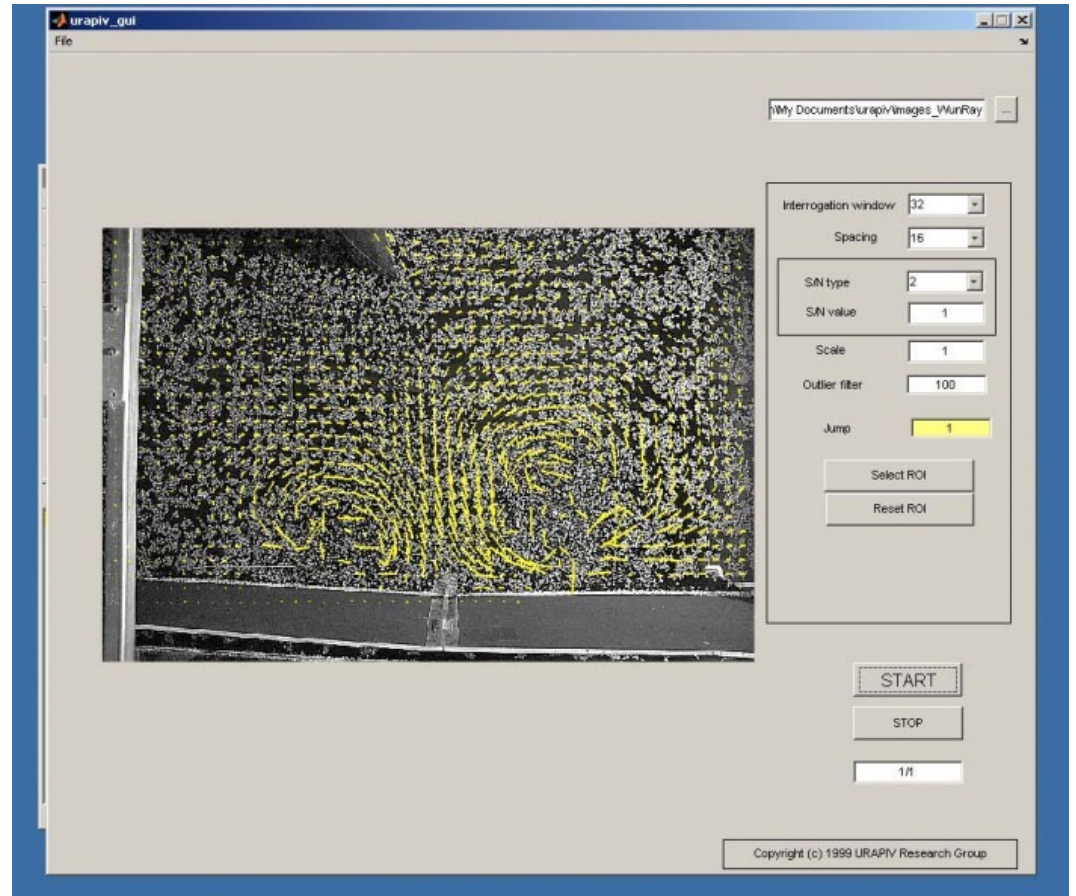
# ***Badania składu chemicznego plazmy***



# Spektrofotometria- analiza odparowania materiału



# Particle Imaging Velocimetry



# Pomiary termowizyjne temperatury podłoża

## PYROVIEW 380 compact with 384 × 288 pixels

	Spectral range <sup>1</sup>	Measurement range <sup>1</sup>	NETD <sup>2</sup>
<b>PYROVIEW 380L compact</b>	8 μm to 14 μm	Range 1: -20 °C to 120 °C Range 2: 0 °C to 500 °C	0.08 K (30 °C, 50 Hz)
<b>PYROVIEW 380M compact</b>	3 μm to 5 μm	Range 1: 100 °C to 300 °C Range 2: 200 °C to 500 °C	0.5 K (200 °C, 50 Hz)
<b>PYROVIEW 380G compact</b>	4.8 μm to 5.2 μm	Range 1: 200 °C to 500 °C Range 2: 400 °C to 1250 °C	1 K (300 °C, 50 Hz)
<b>PYROVIEW 380F compact</b>	3.9 μm	600 °C to 1250 °C	1 K (600 °C, 50 Hz)

Optics with motor or manual focussing.

Field of view (L-Version):

30° × 23°, 60° × 47°, 44° × 34°, 22° × 16°, 11° × 8°, 7° × 5°<sup>03</sup>, Macro 60 μm

Field of view (M-, G-, F-Version):

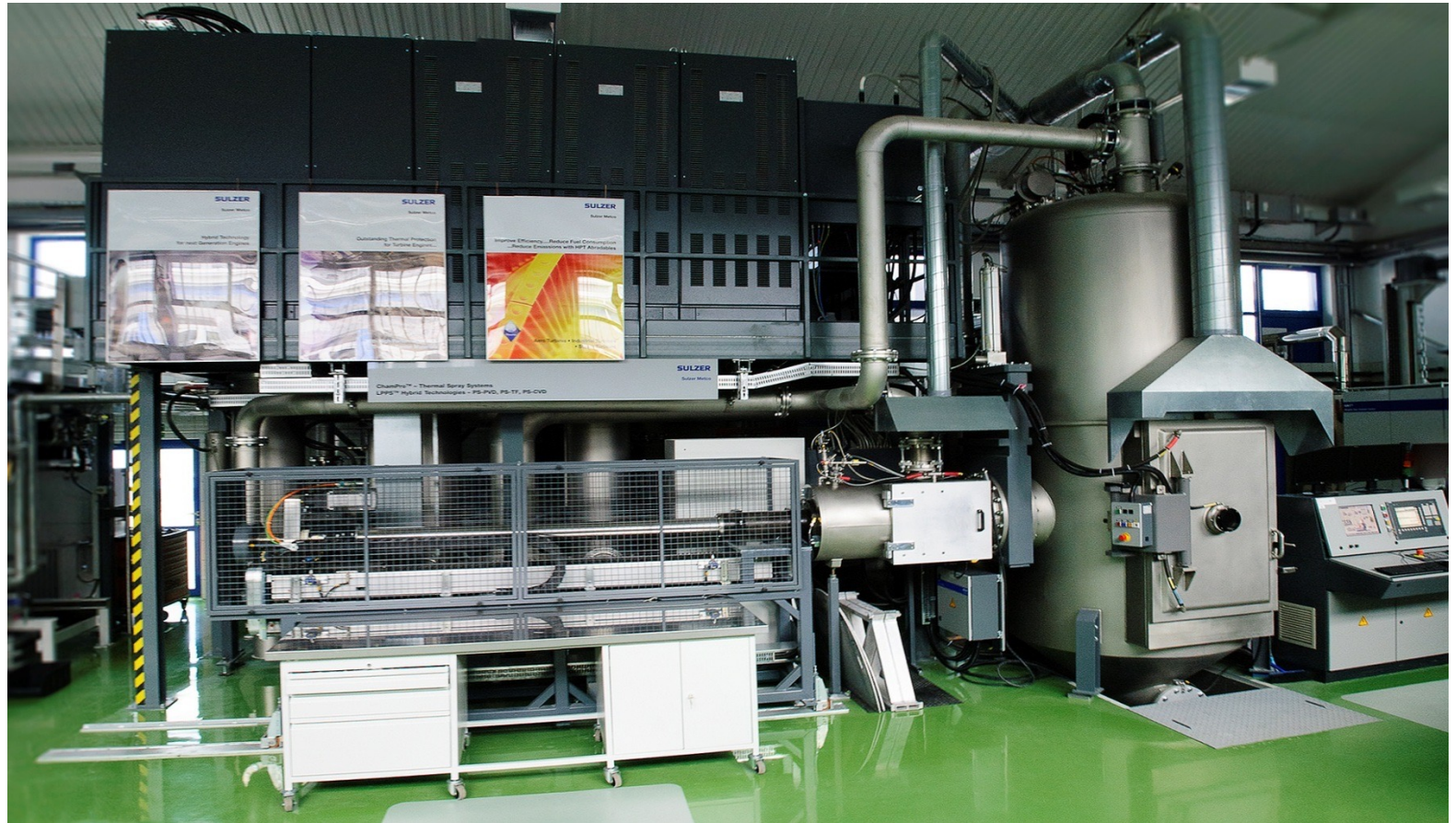
30° × 23°, 51° × 40°, 15° × 12°



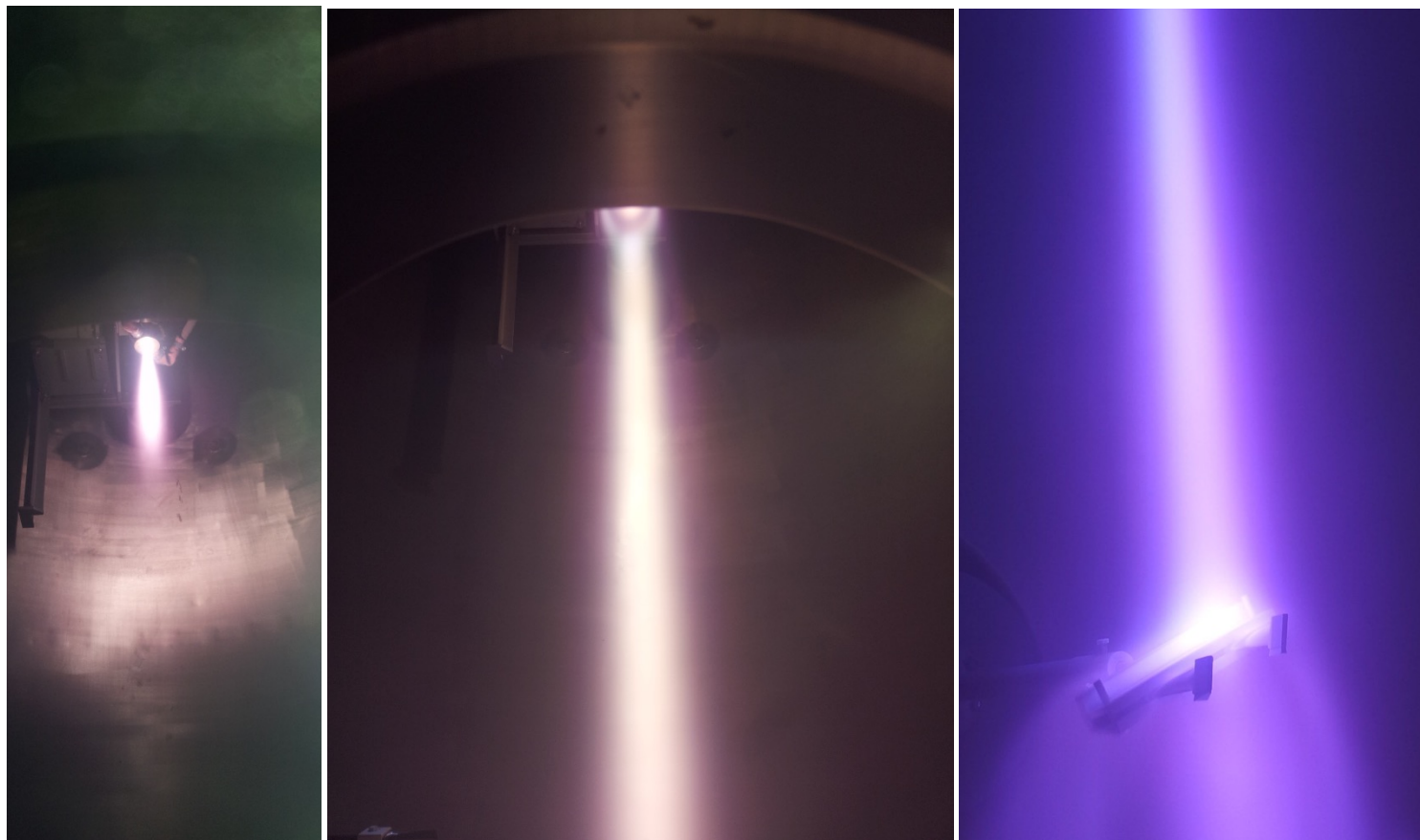
## ***Zastosowanie metody LPPS-TF oraz PS-PVD - zalety***

- ❖ niższe koszty w porównaniu z metodą EB-PVD
- ❖ Możliwość osadzania na dużych łopatkach turbiny niskiego ciśnienia oraz segmentach
- ❖ Możliwość osadzania międzywarstwy w jednym procesie wraz z warstwą ceramiczną

# ***Proces natryskiwania warstwy ceramicznej na łopatkę turbiny metodą PS-PVD***



# ***Urządzenie do natryskiwania plazmowego metodą LPPS-TF i PS-PVD***



# *Cel i zakres badań*

Dostępne dane literaturowe ukierunkowały plan badań na określenie wpływu 4 czynników :

- mocy palnika w trakcie procesu,
- składu chemicznego gazów plazmotwórczych,
- prędkości ruchu próbki,
- ciśnienia w procesie.

# Przykład technologii wytwarzania powłok TBC metodą PS-PVD

Materiał podłoża- stop Rene 80 oraz proszek do wytworzenia międzywarstwy

Materiał	Ni	Co	Cr	W	Mo	Al	Ti	Zr	C	Ta	Y
Rene 80	reszta	9.5	14	4	4	3	5	0,06	0,17	-	-
AMDRY 997	reszta	23	20	-	-	8.5	-	-	-	4	0.6

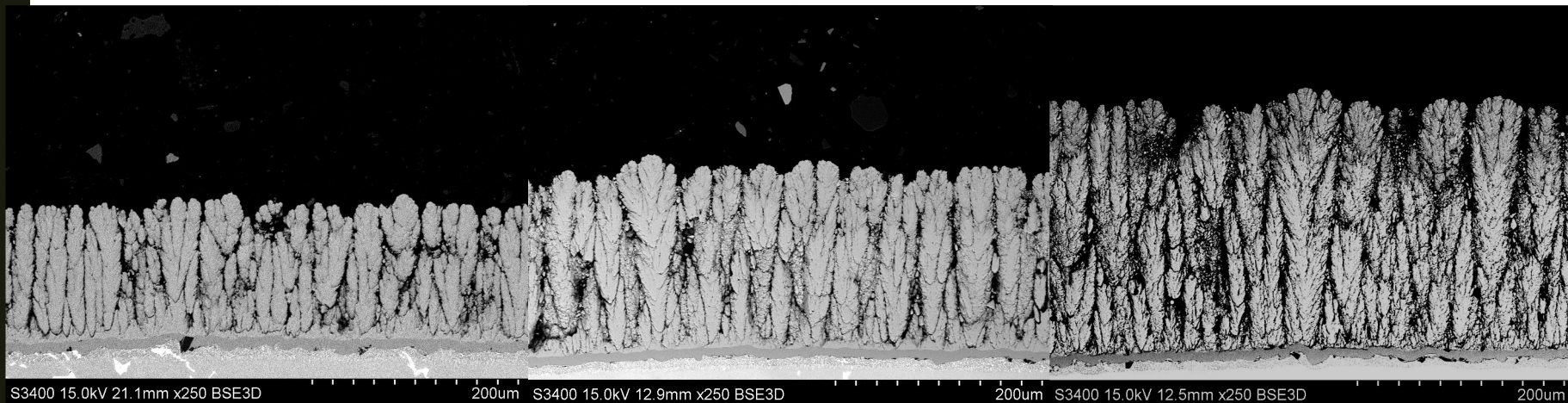
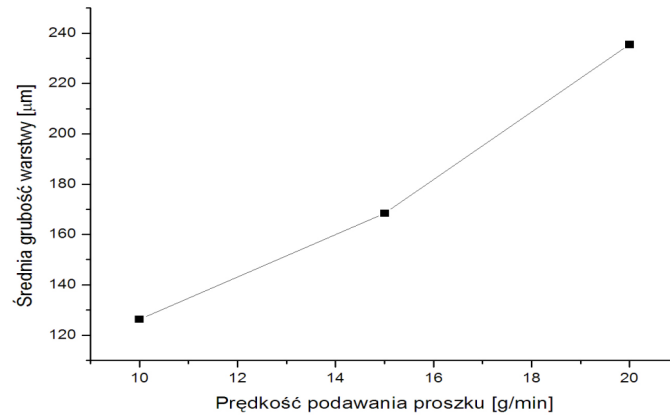
## Międzywarstwy:

- **dyfuzyjna warstwa aluminidkowa** typu NiAl modyfikowana cyrkonem wytworzoną w procesie chemicznego osadzania z fazy gazowej (CVD, chemical vapour deposition) z zastosowaniem urządzenia BPX Pro 325S firmy IonBond
- konwencjonalna warstwa oparta na wieloskładnikowym stopie typu **MeCrAlY** (proszek AMDRY 997 firmy Sulzer-Metco) osadzaną metodą natryskiwania plazmowego w warunkach ciśnienia atmosferycznego (APS).

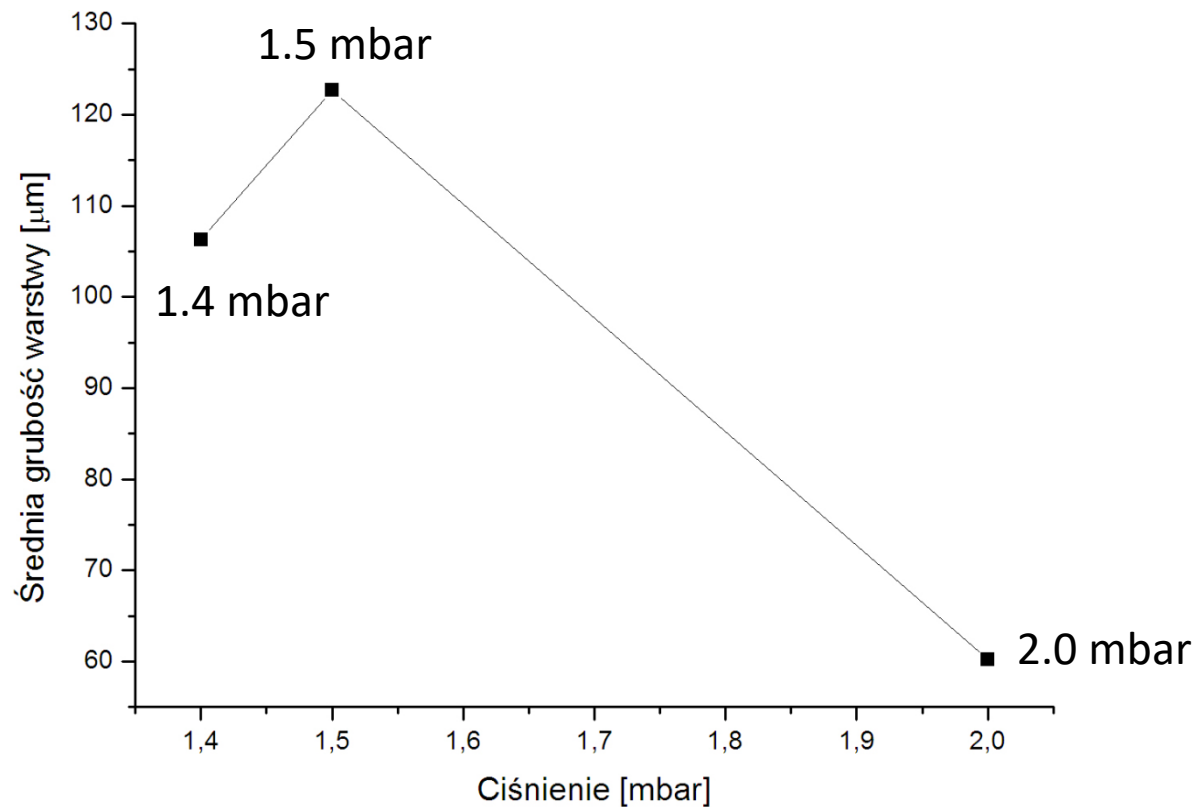
## ***Wartości parametrów osadzania zmieniane w trakcie procesu PS-PVD***

<b>Zmienna</b>	<b>Wartości</b>
<b>Ciśnienie [mbar]</b>	<b>1.4, 1.5, 2.0</b>
<b>Natężenie prądu [A]</b>	<b>1600, 2200, 2400</b>
<b>Obroty próbki [rpm]</b>	<b>2, 10, 20</b>
<b>Ilość podawanego proszku [g/min]</b>	<b>10, 15, 20</b>
<b>Stosunek Ar/He</b>	<b>2:1, 1:1, 1:2</b>

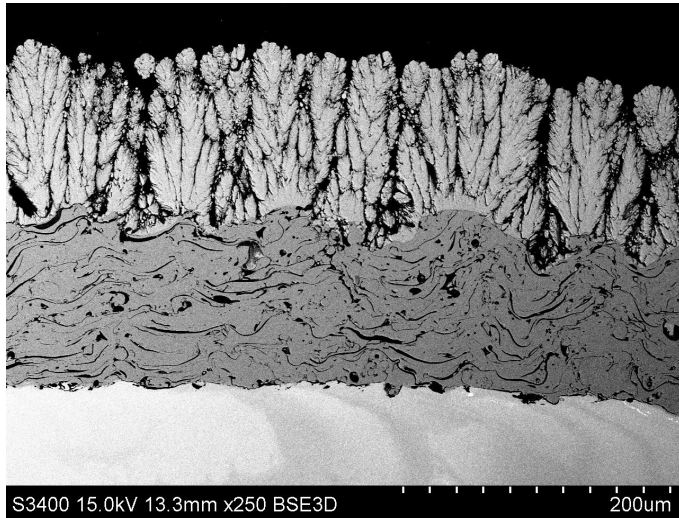
# Wpływ ilości podawanego proszku



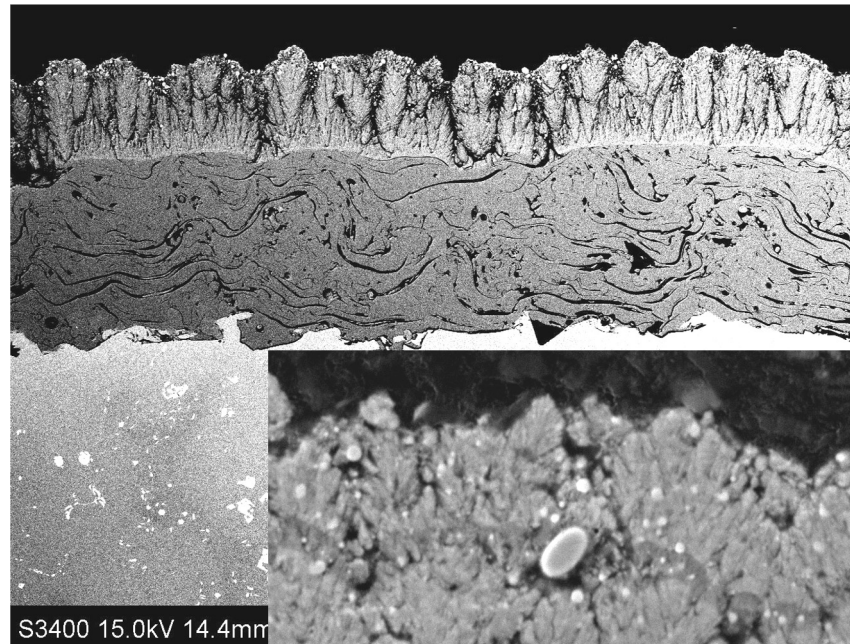
# *Wpływ ciśnienia w komorze roboczej*



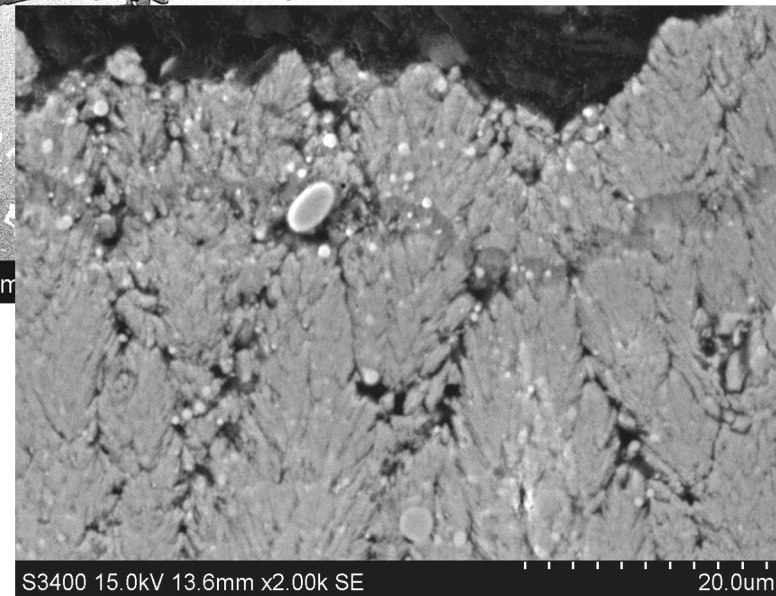
# ***Wpływ ciśnienia w komorze roboczej***



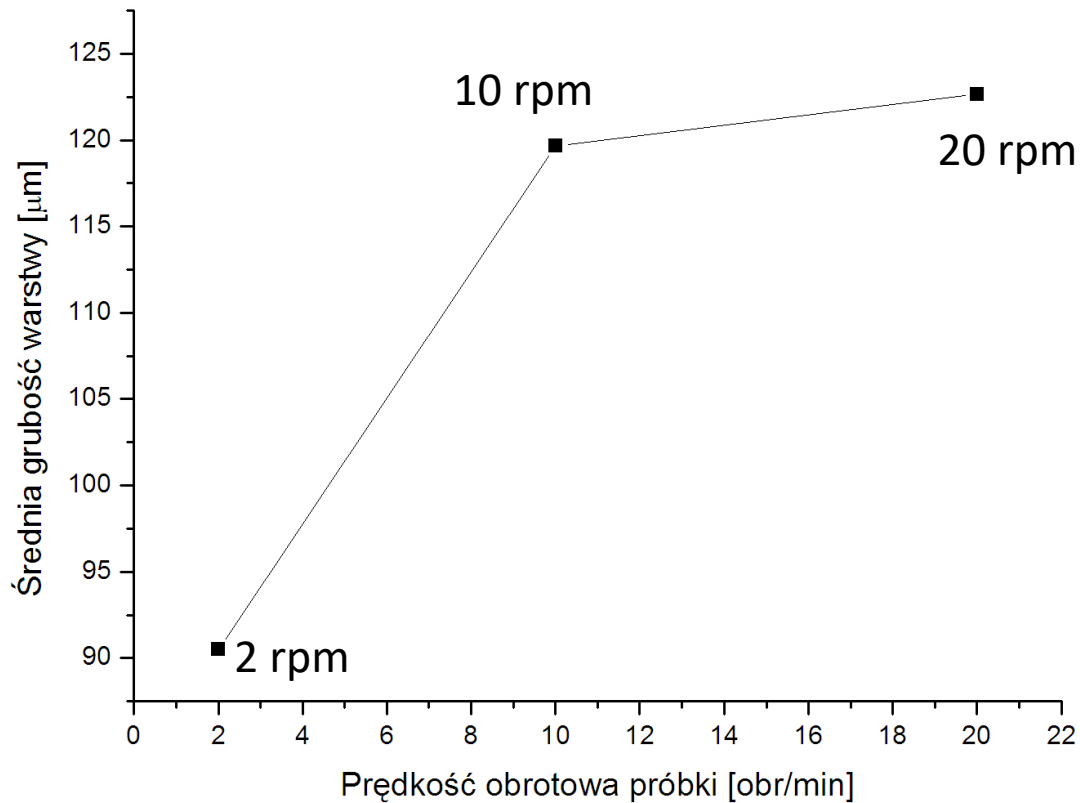
1.5 mbar



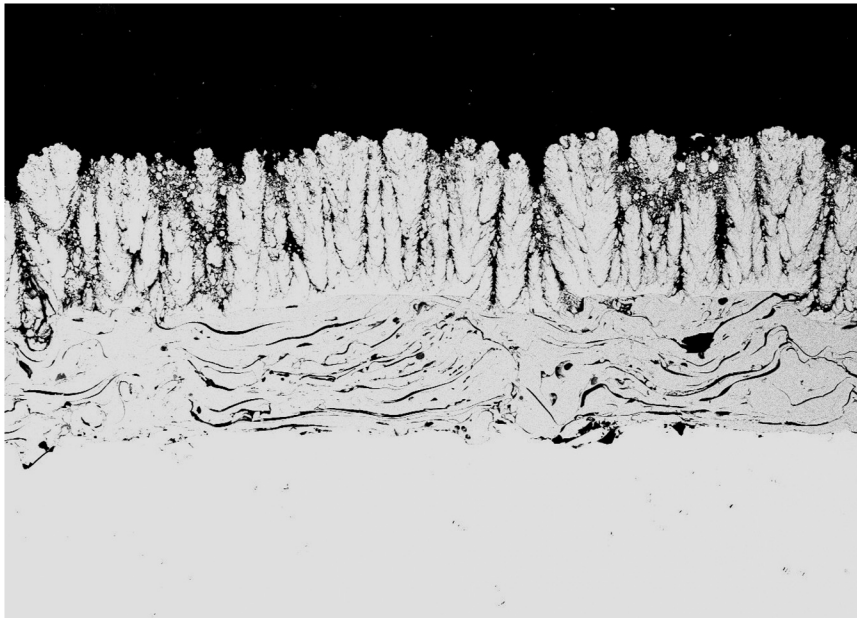
2.0 mbar



# ***Wpływ prędkości obrotowej próbki***

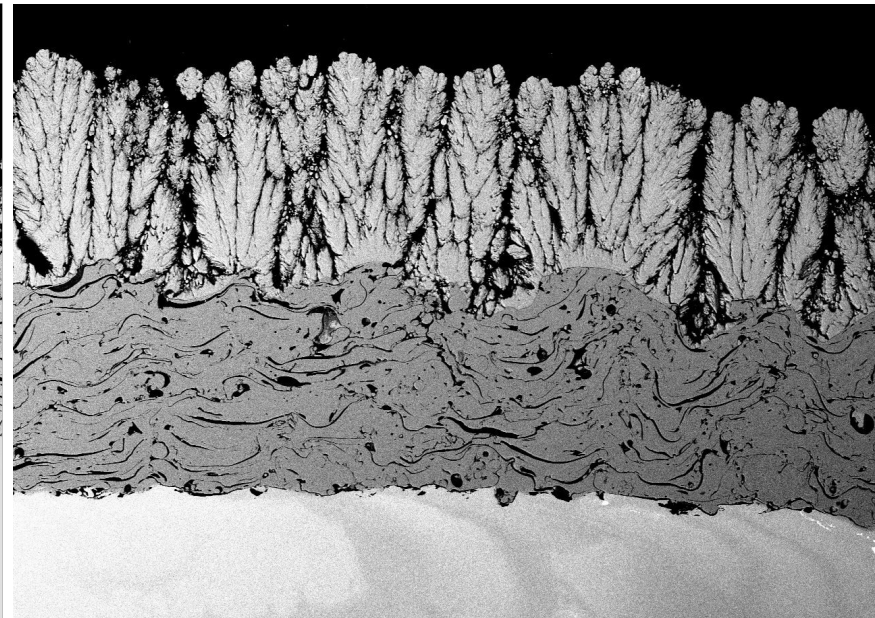


# ***Wpływ prędkości obrotowej próbki***



S3400 15.0kV 14.3mm x250 BSE3D 200um

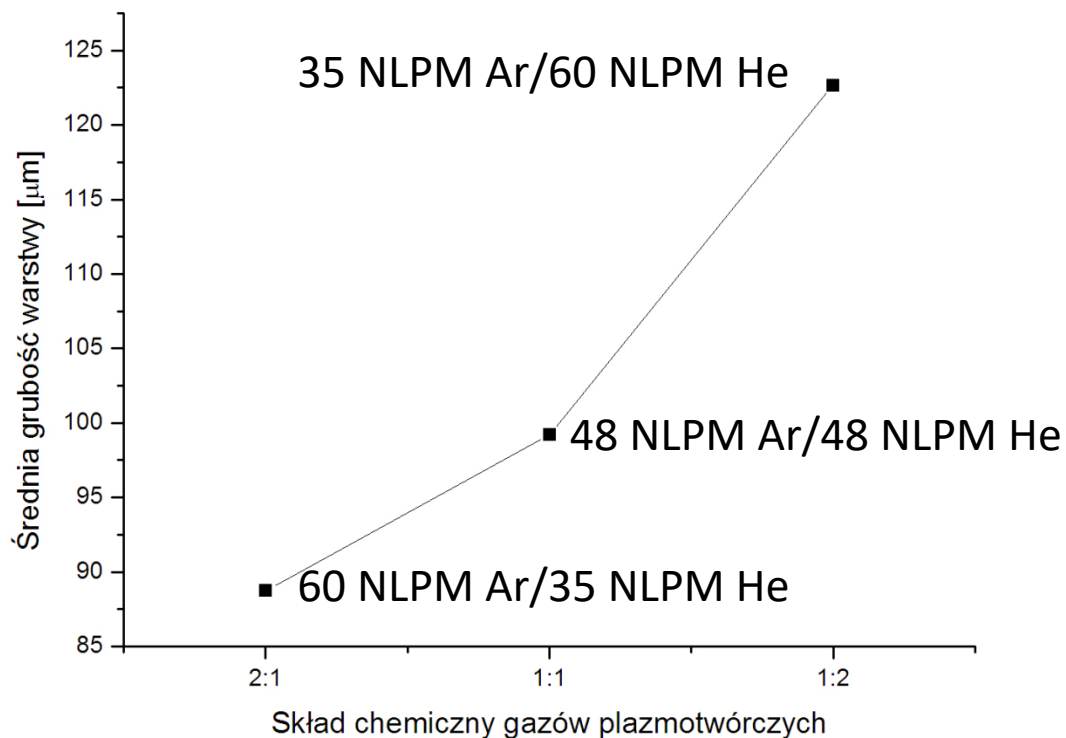
2 rpm



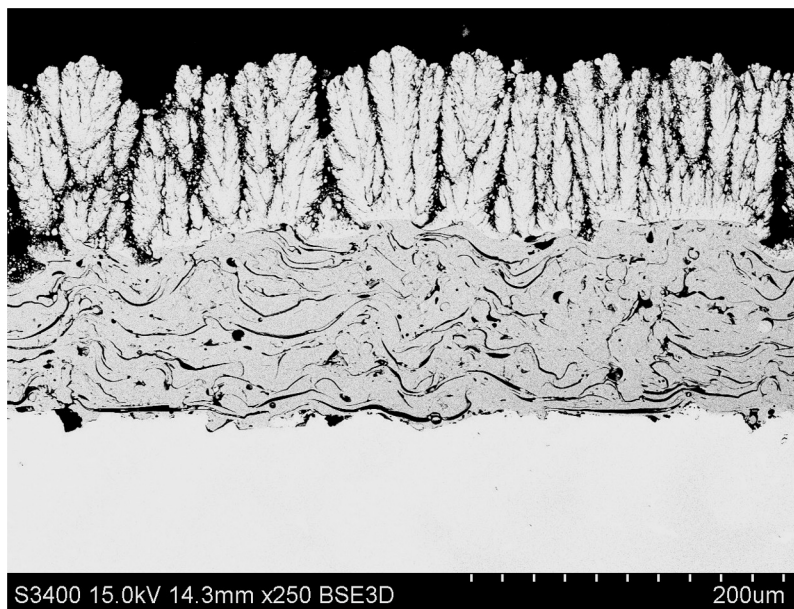
S3400 15.0kV 13.3mm x250 BSE3D 200um

20 rpm

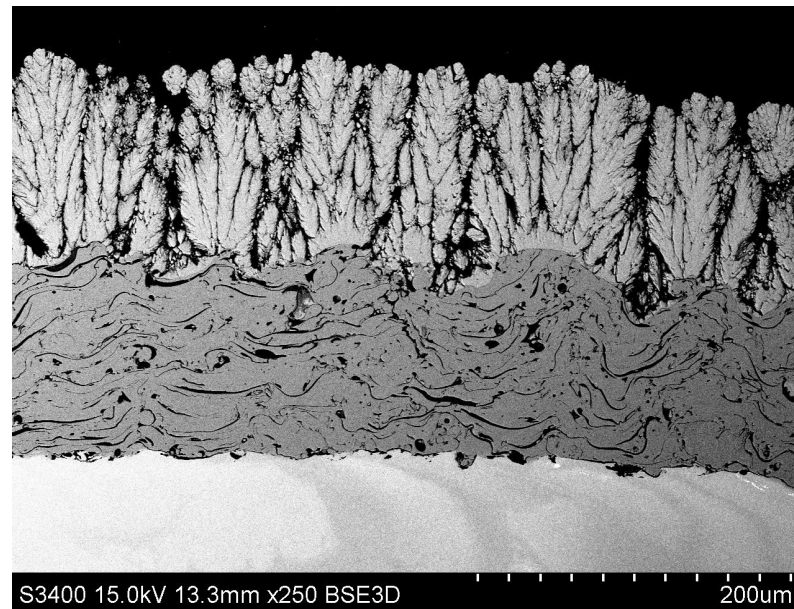
# ***Wpływ składu chemicznego gazów plazmotwórczych***



# ***Wpływ składu chemicznego gazów plazmotwórczych***

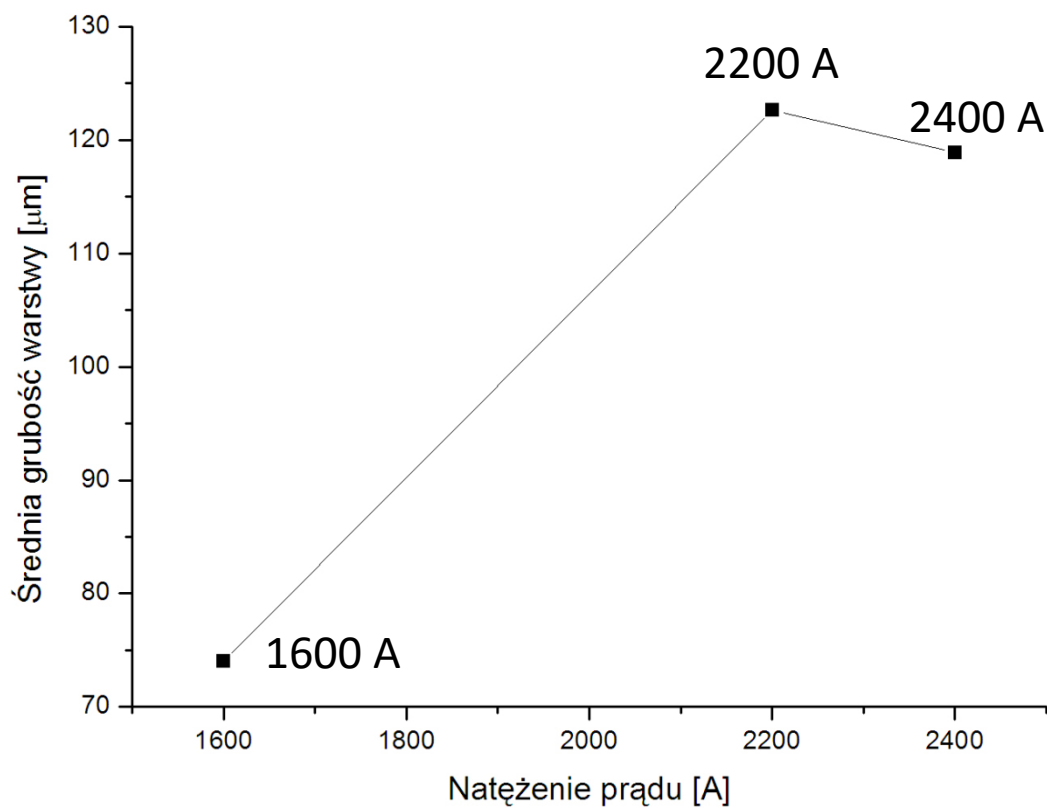


60 NLPM Ar/35 NLPM He

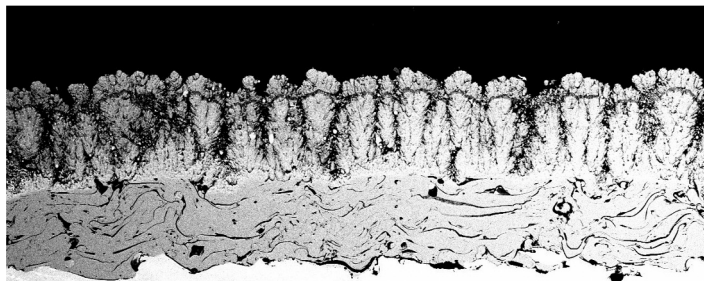


35 NLPM Ar/60 NLPM He

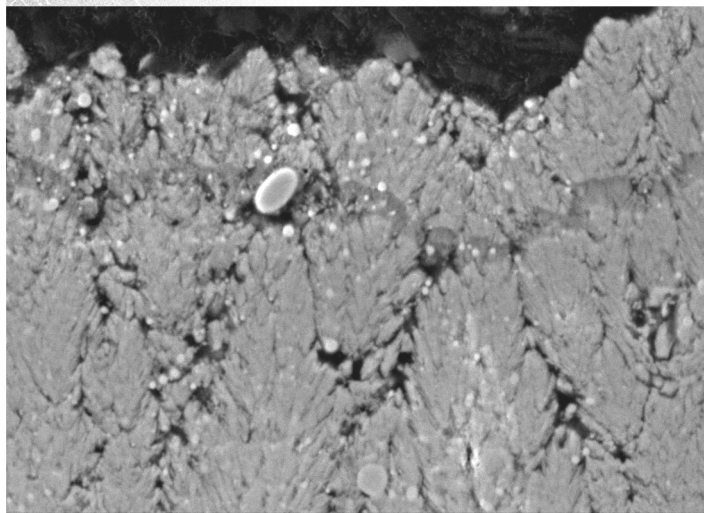
# ***Wpływ mocy palnika***



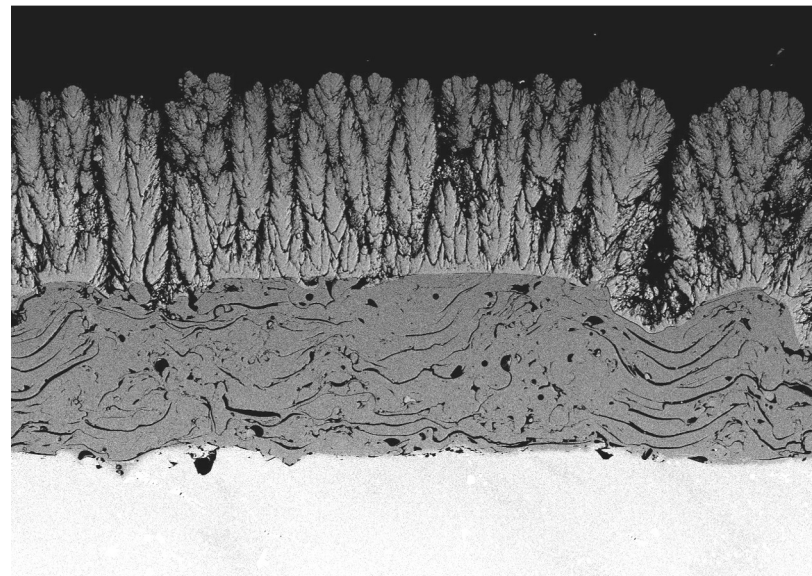
# ***Wpływ mocy palnika***



1600 A



S3400 15.0kV 13.6mm x2.00k SE 20.0um



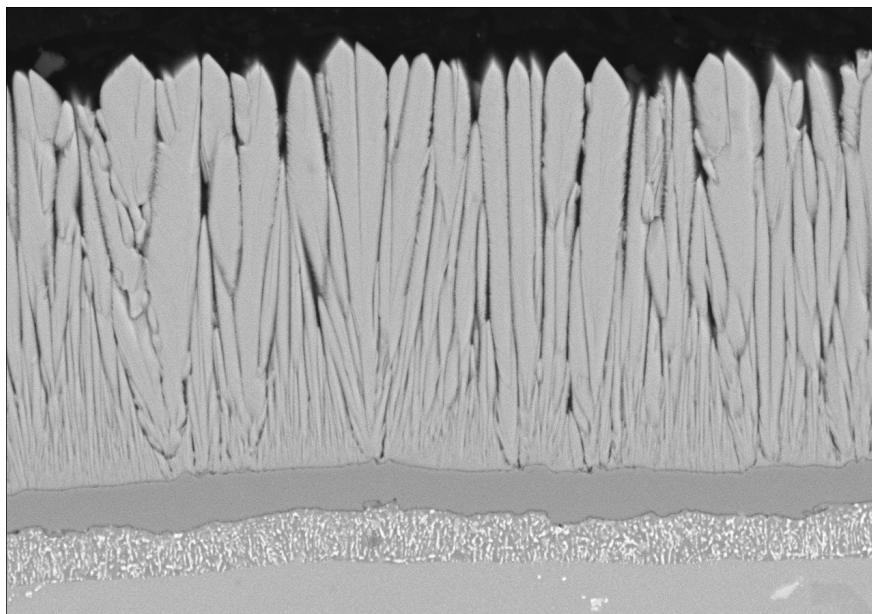
S3400 15.0kV 13.6mm x250 BSE3D 200um

2400 A

# ***Podsumowanie***

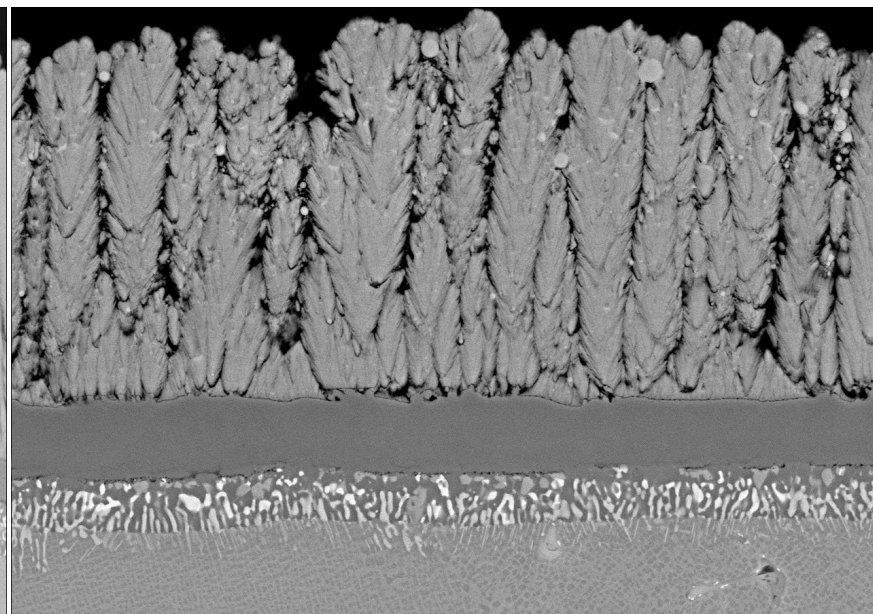
- ❖ Największy wpływ na grubość tworzącej się warstwy ceramicznej mają:
- ❖ ilość podawanego proszku,
- ❖ ciśnienie w komorze roboczej
- ❖ moc palnika.

# *Przyszłość która nie nadaszeszła*



S3400 25.0kV 10.1mm x700 BSE3D

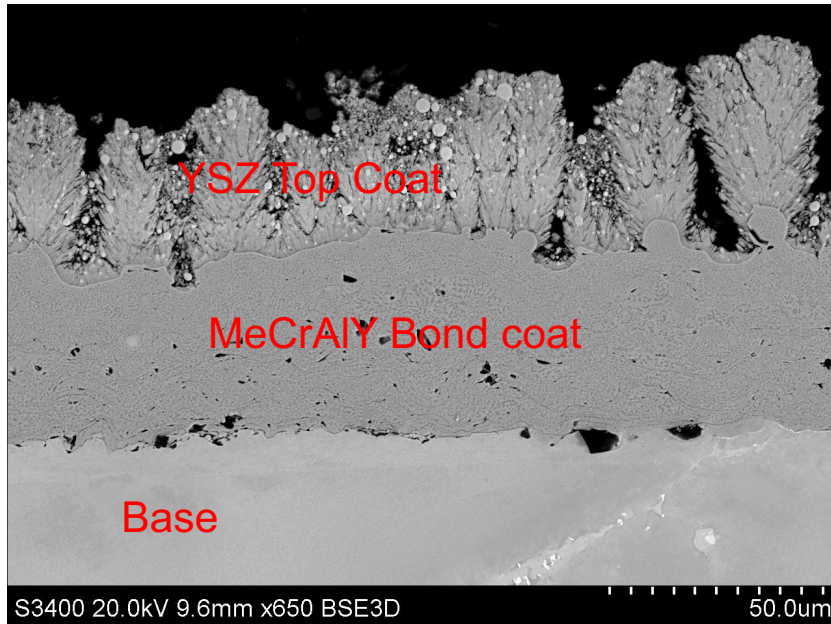
50.0um



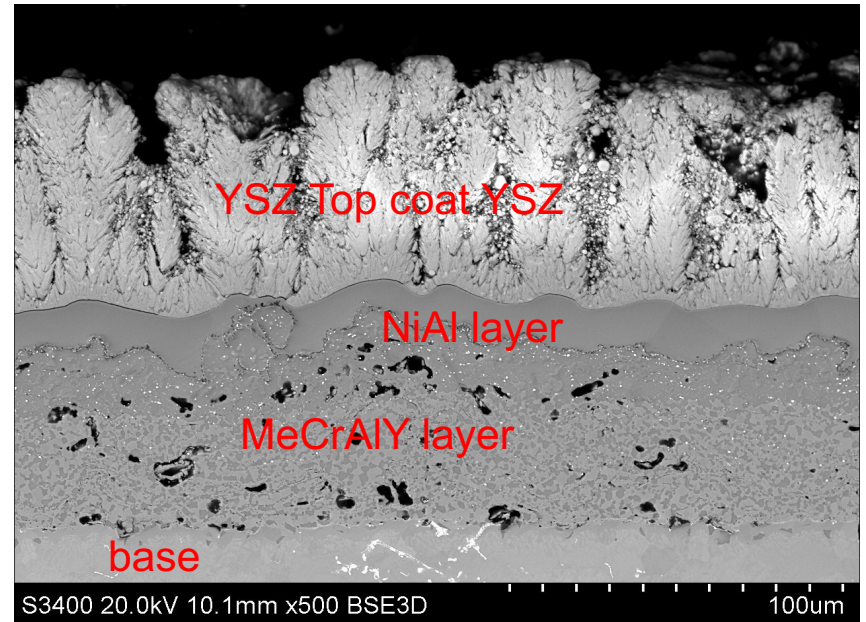
S3400 25.0kV 9.5mm x850 BSE3D

50.0um

# Overaluminizing



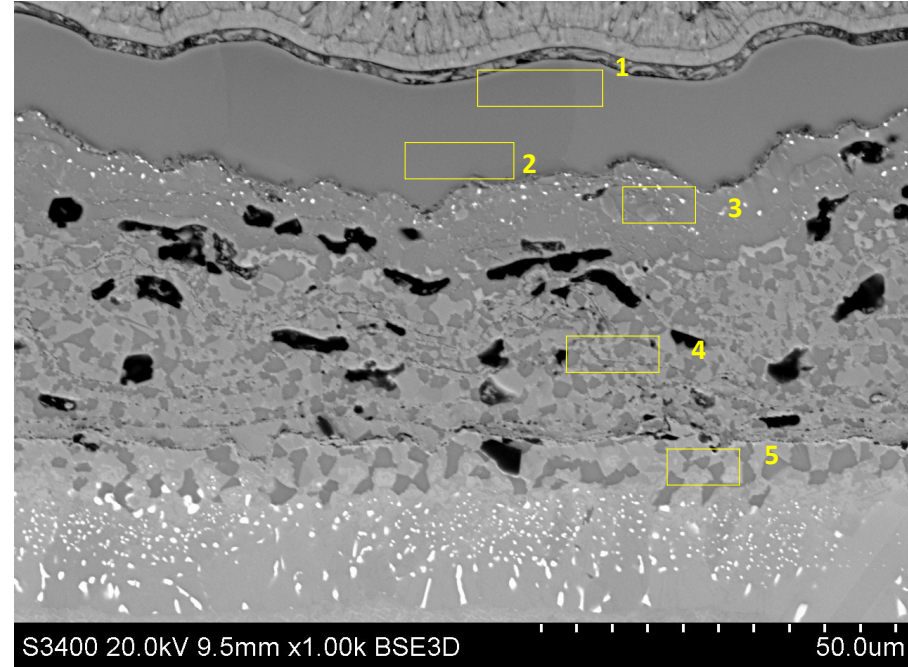
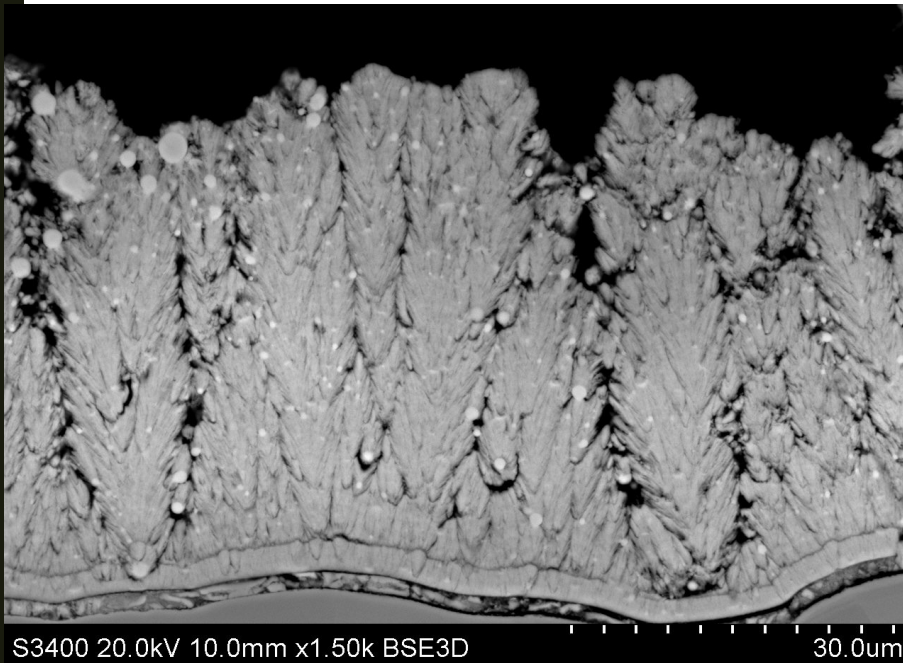
Without aluminizing



After additional CVD aluminizing

Microstructure of TBCs deposited on Rene 80 Ni Superalloy

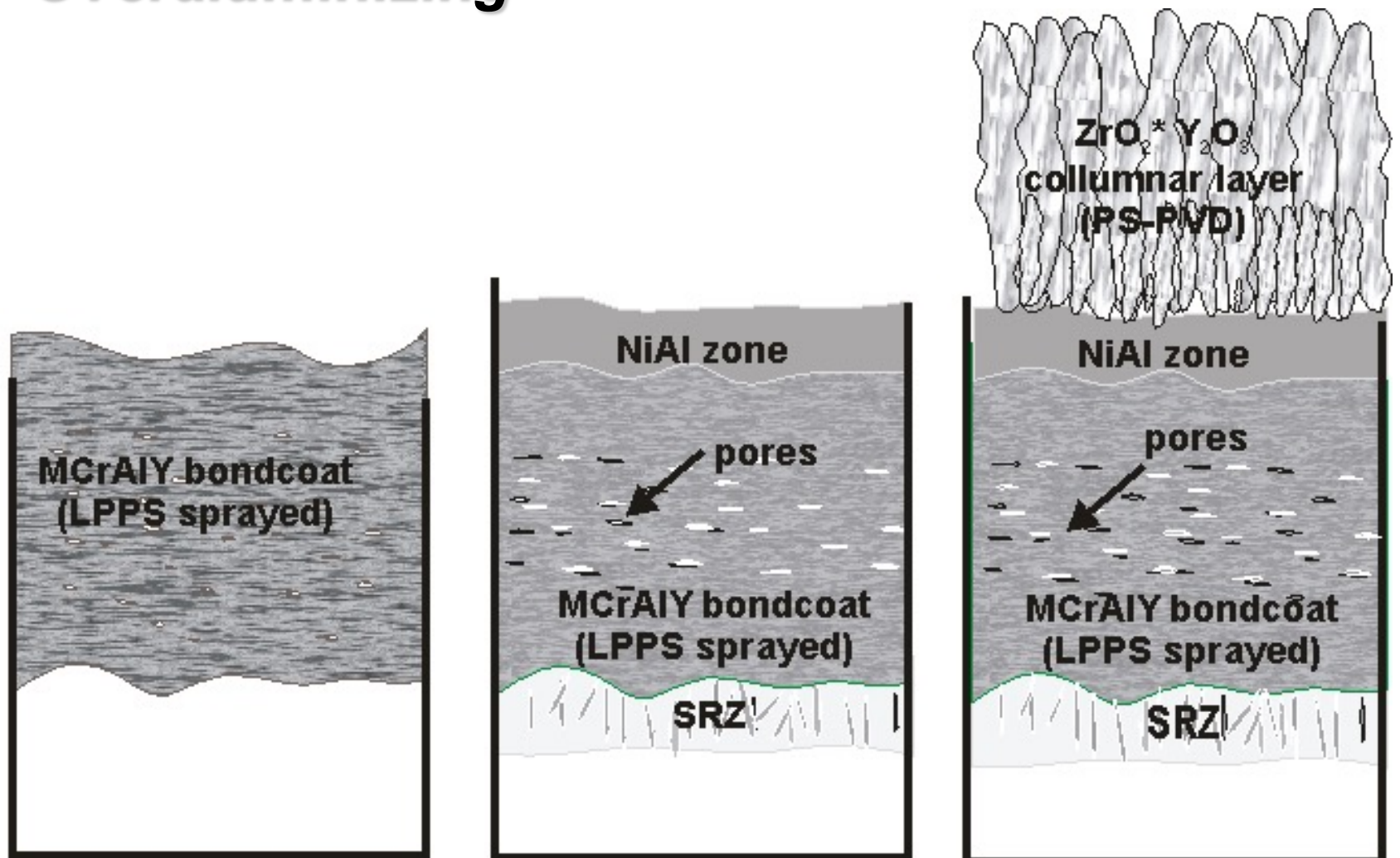
# Overaluminizing



<i>Area/ Point</i>	<i>Al</i>	<i>Si</i>	<i>Ti</i>	<i>Cr</i>	<i>Fe</i>	<i>Co</i>	<i>Ni</i>	<i>Y</i>
<b>1</b>	43.64			2.24	1.03	10.10	42.99	
<b>2</b>	36.94	1.43		5.78	0.55	11.87	43.43	
<b>3</b>	26.40	3.66	0.24	24.05		10.79	34.52	0.34
<b>4</b>	24.47	3.37	0.20	16.35	0.57	16.15	38.13	0.76
<b>5</b>	16.94	7.34	2.29	19.97		17.56	35.91	

Microstrutcute of TBCs deposited on CMSX-4 SC Superalloy

# Overaluminizing



# ***Surface morphology after 1000h static oxidation test at 1100°C***

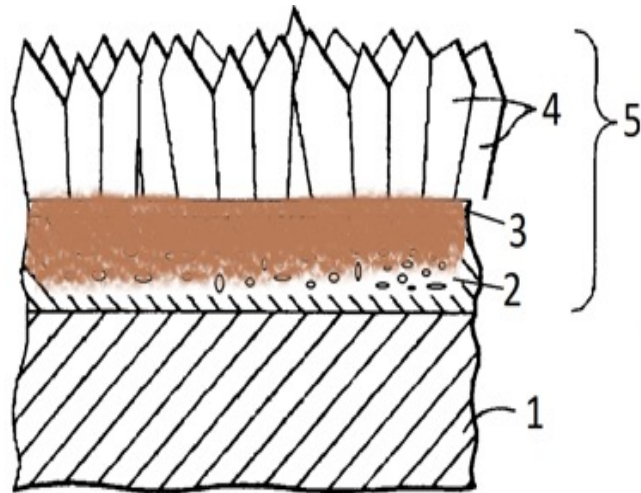


**Without aluminizing**



**After additional CVD overaluminizing**

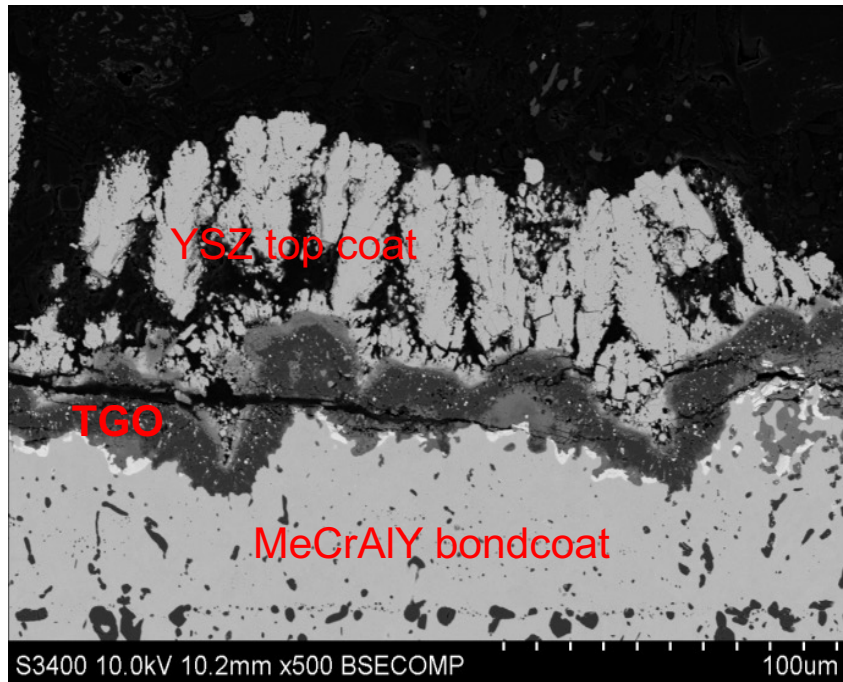
# ***Scheme of TBCs with overaluminized bond coat after oxidation test***



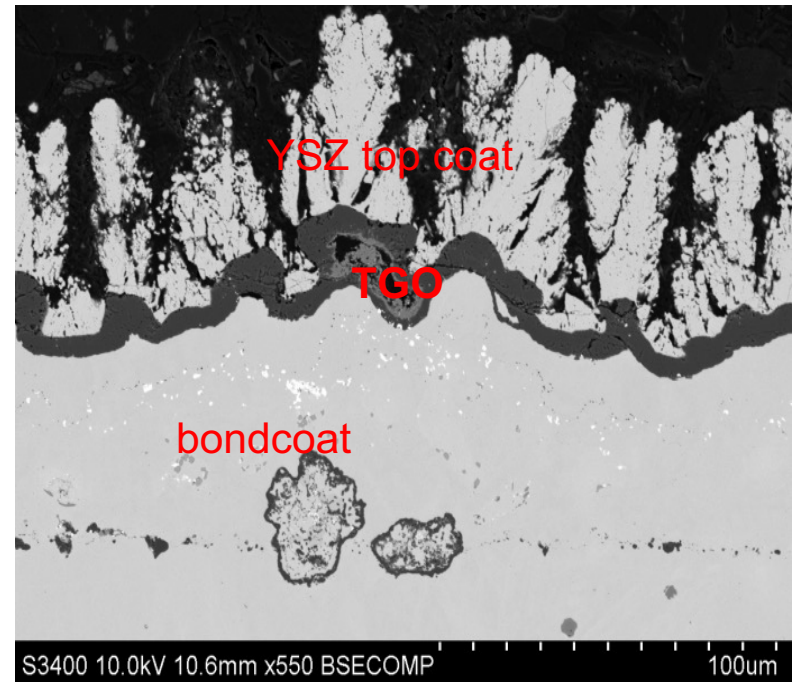
- 1- Base material**
- 2- MCrAlY bond coat**
- 3- Thermally Grown Oxides (TGO)**
- 4- Ceramic coating**
- 5- TBC**

Schemat budowy powłoki po próbie utleniania

# Results of isothermal oxidation for 1000h at 1100°C



Without aluminizing



After overaluminizing

The IN 617 base materials