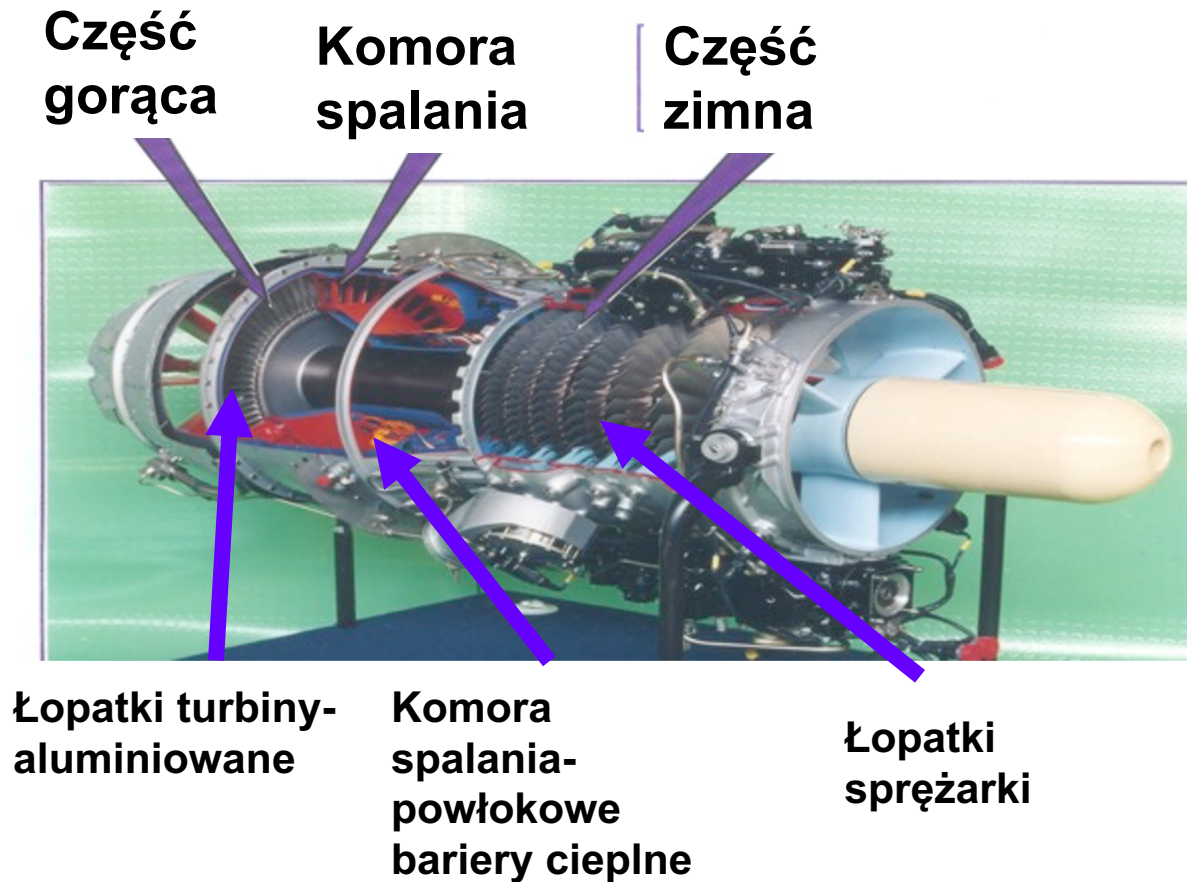


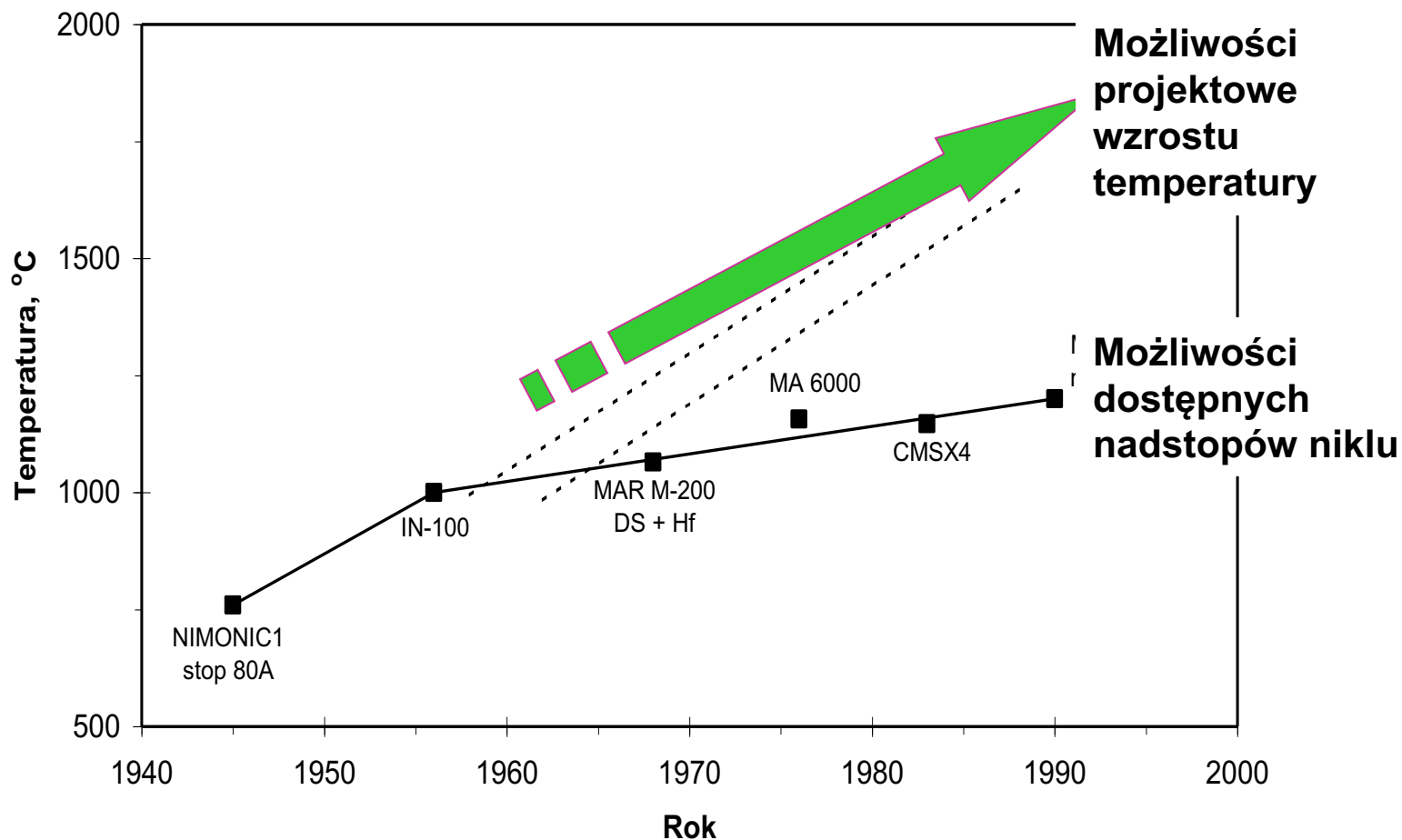


**DYFUZYJNE WARSTWY
ALUMINIDKOWE W
TECHNICE LOTNICZEJ**

Przykłady elementów silników lotniczych z warstwami i powłokami

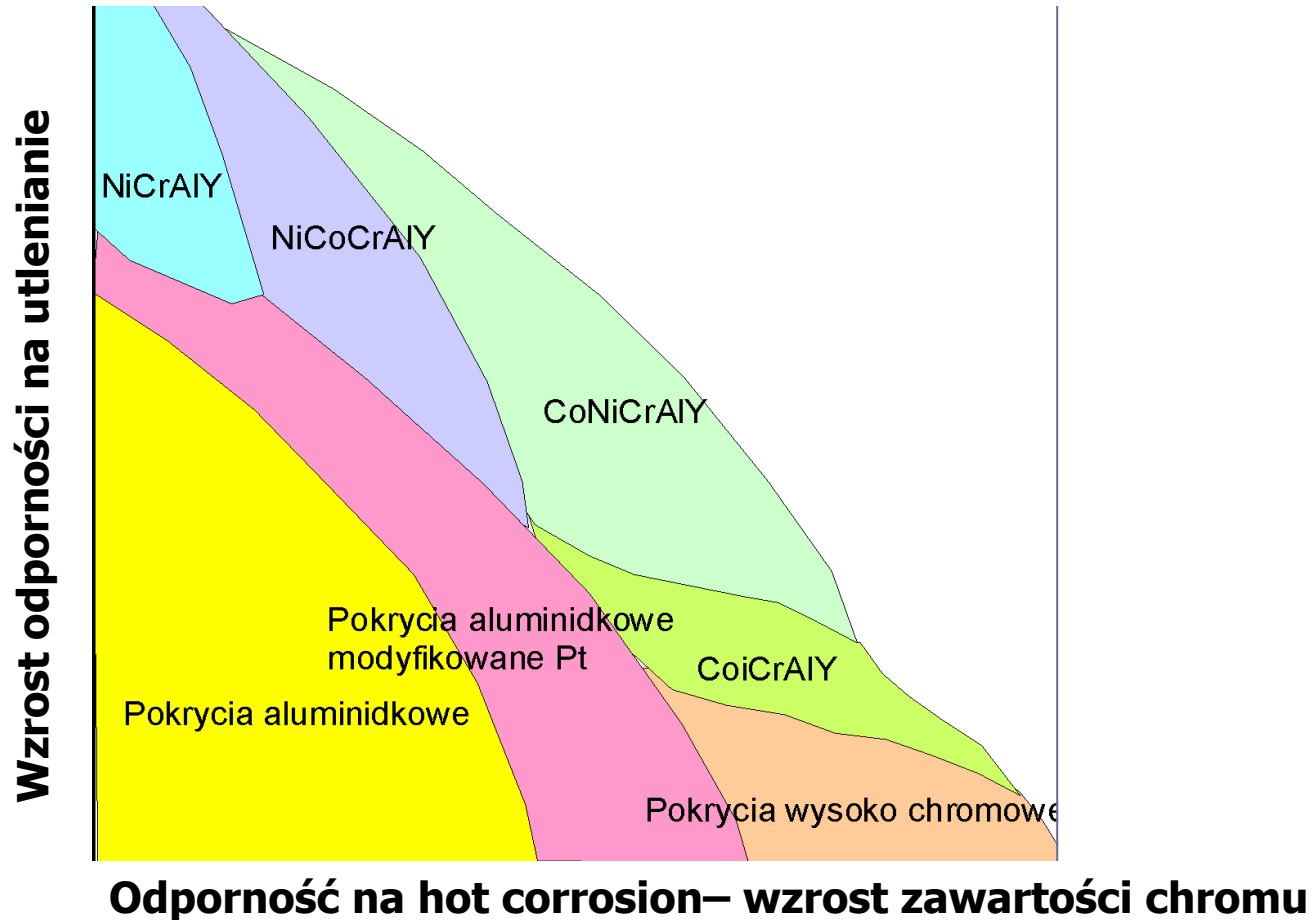


Rozwój stopów żarowytrzymałych oraz możliwości uzyskania temperatury gazów wylotowych wg możliwości projektowania

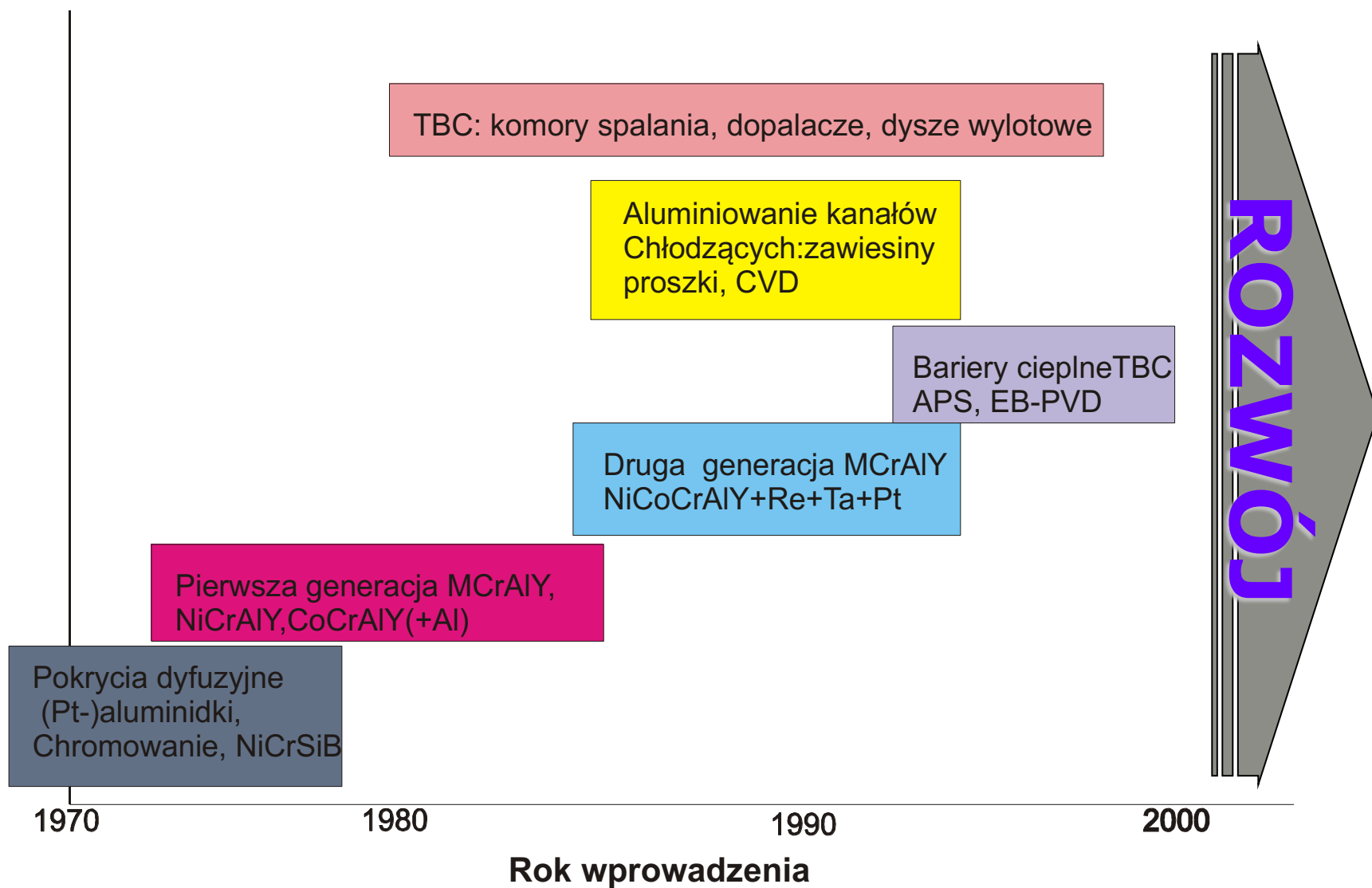


(A.K.Koul et all)

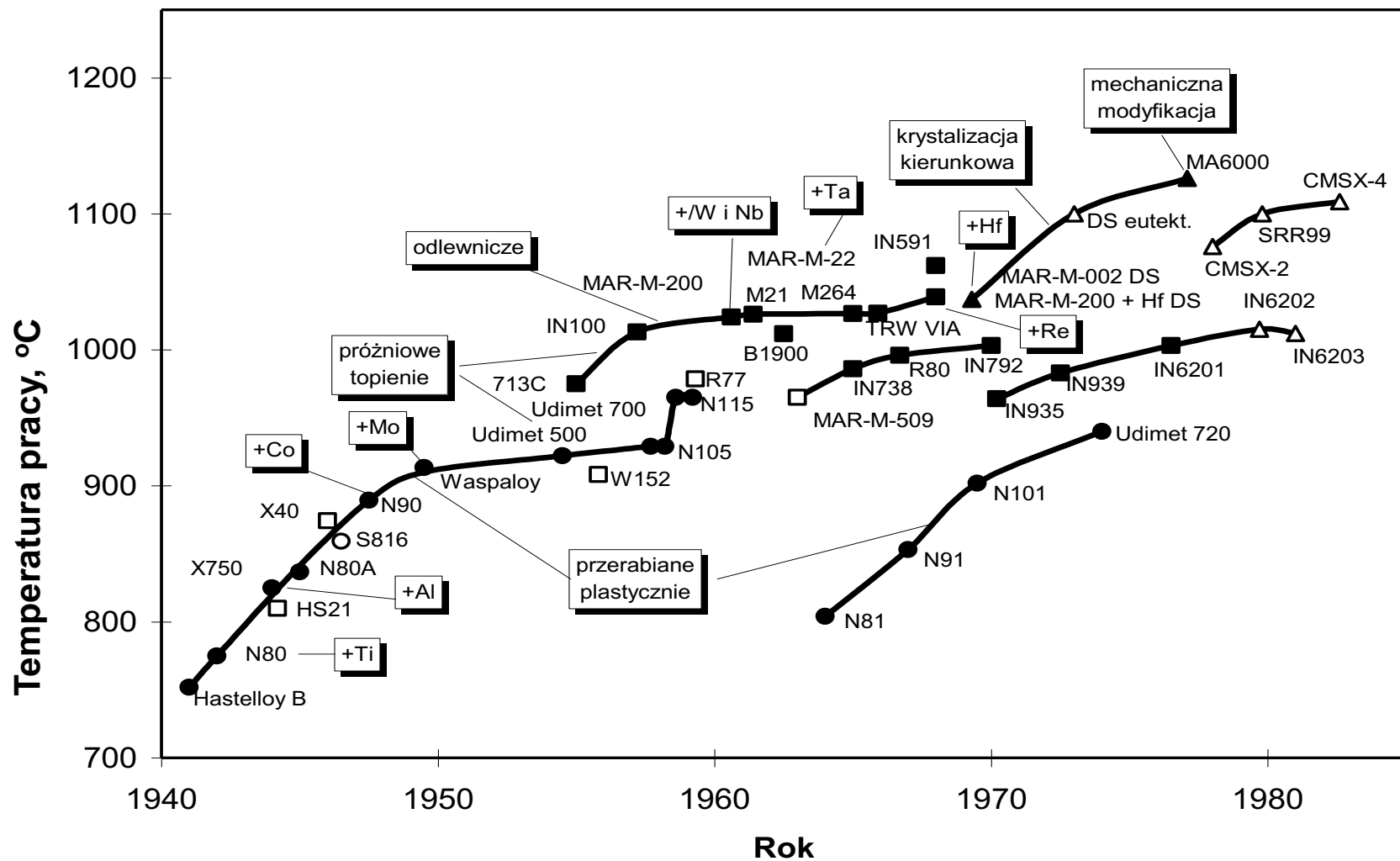
Warstwy i powłoki żaroodporne – kryteria zastosowania w zależności od warunków pracy



Rozwój technologii powłok i warstw żaroodpornych



Rozwój nadstopów niklu na elementy turbin gazowych oraz technologii ich wytwarzania



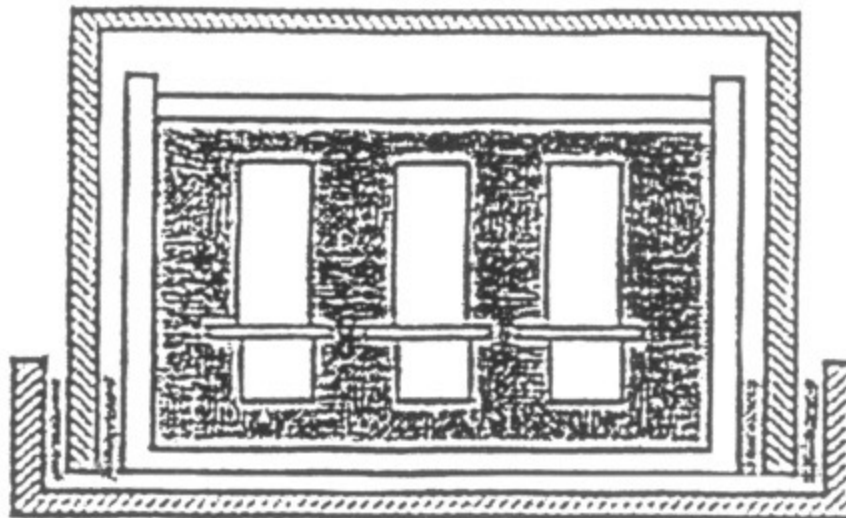
Wymagane właściwości nadstopów niklu stosowanych do wytwarzania elementów turbin gazowych i silników lotniczych

| turbina | stacjonarna | lotnicza |
|-----------------------------|--------------------|-----------------|
| wymagane właściwości | | |
| pełzanie | > 50 000 h | > 4 000 h |
| zmęczenie cieplne | > 3 000 cykli | >20 000 cykli |
| utlenianie | > 50 000 h | > 20 000 h |
| hot corrosion | > 50 000 h | > 20 000 h |
| stabilność struktury | > 50 000 h | > 20 000 h |
| wielkość elementu | 100-500 mm | 50 - 300 mm |
| masa elementu | 500 - 5 000 g | 50 - 500 g |

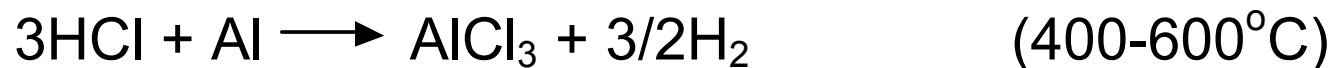
***ALUMINIOWANIE
METODĄ
KONTAKTOWO-GAZOWĄ
(ALITEROWANIE)
PACK ALUMINIZING
PACK CEMENTATION***

Podstawowe cechy aluminiowania metodą kontaktowo-gazową

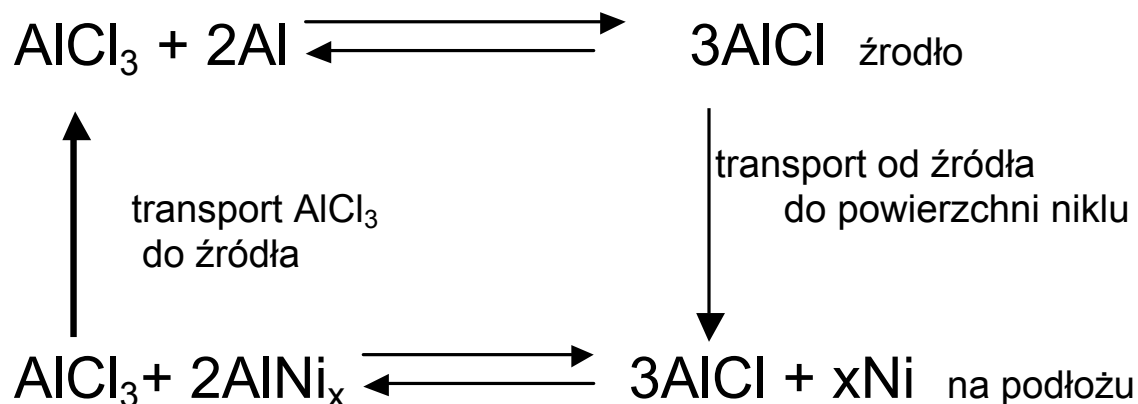
- ❖ *Aluminiowane części umieszczane są bezpośrednio w skrzynce metalowej wypełnionej proszkiem*
- ❖ *Składniki proszku: źródło Al (proszek Al, Al-Fe, Al-Co), wypełniacz (Al_2O_3), aktywator halogenkowy (NH_4Cl , $AlCl_3$)*
- ❖ *Skrzynka umieszczona w piecu komorowym w temperaturze 900-1100°C, czas procesu, 4-12h*
- ❖ *Proces nisko lub wysoko aktywny – zależnie od dominującego kierunku dyfuzji*



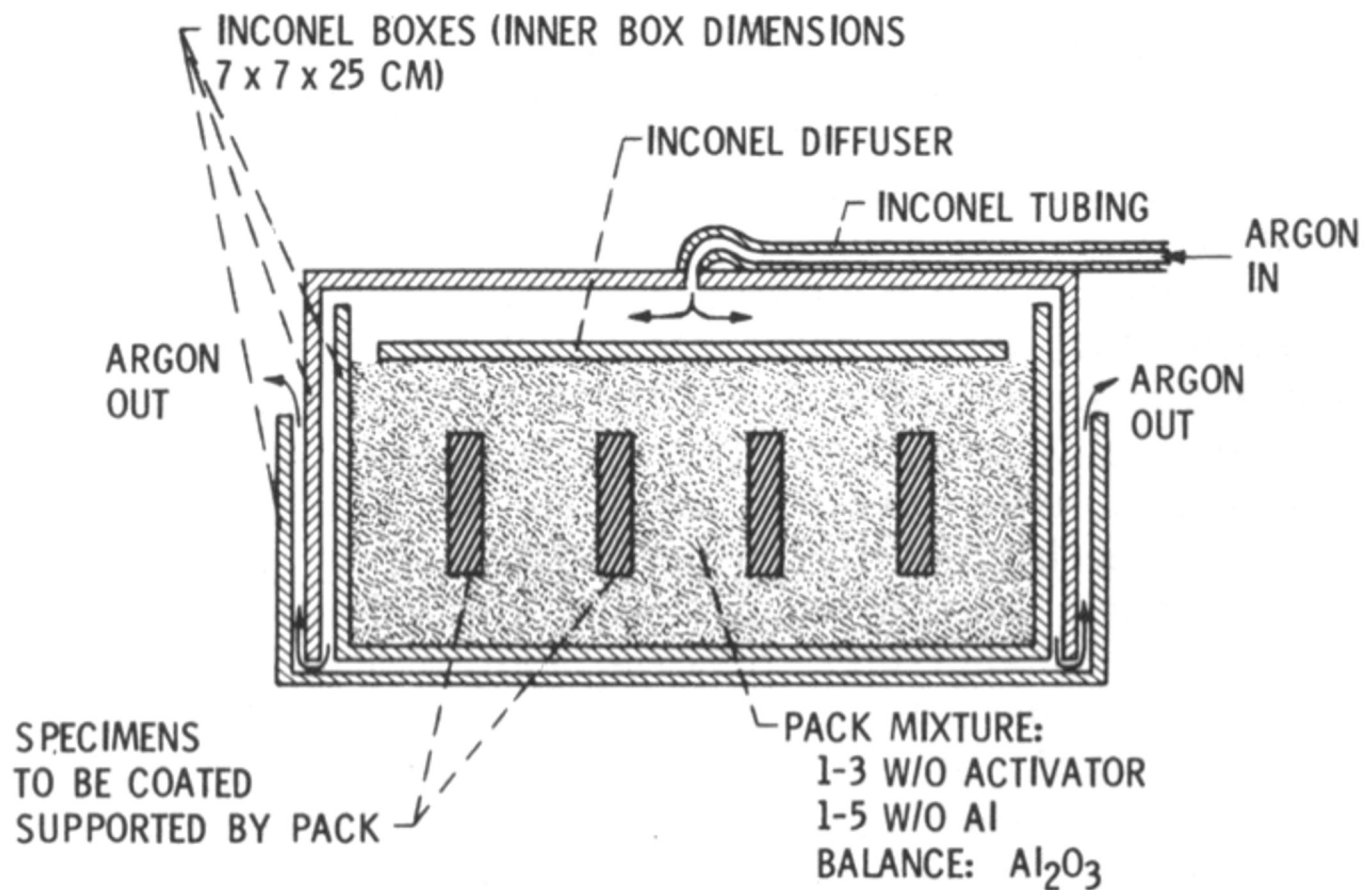
Reakcje prowadzące do wytworzenia atmosfery reakcyjnej



Schemat reakcji z materiałem podłoża-nadstopem niklu



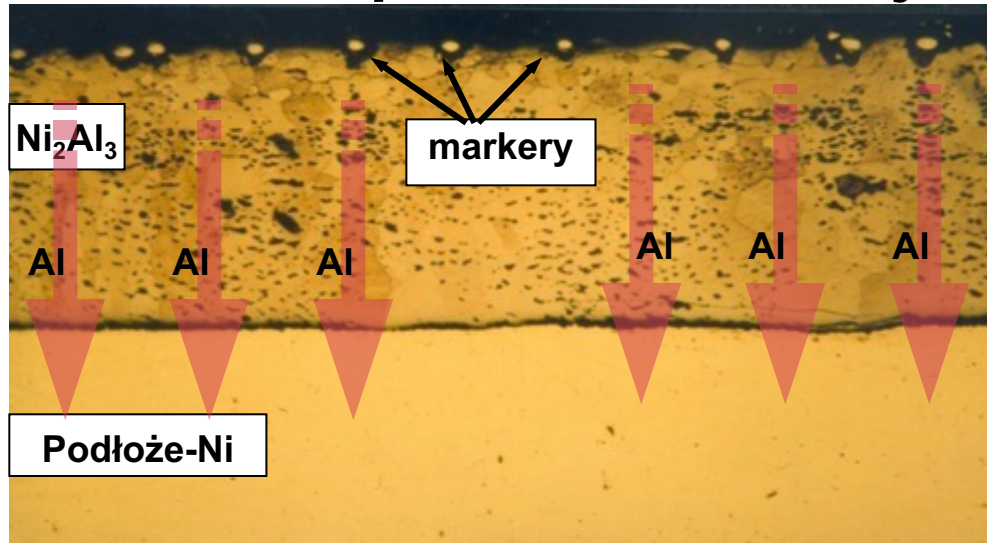
Założenia metody kontaktowo- gazowej



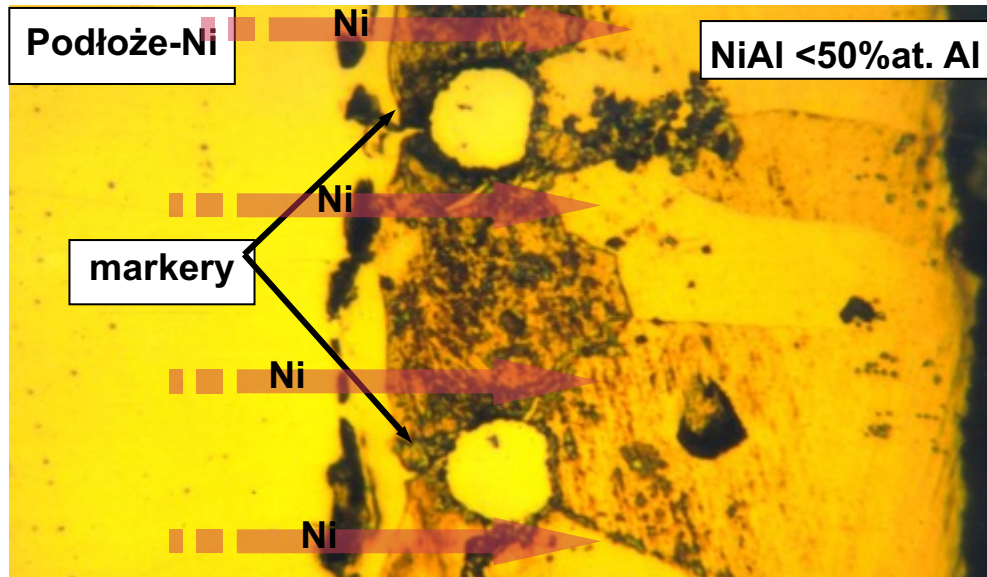
Technologia aluminiowania metodą kontaktowo-gazową

- ❖ Typowa technologia otrzymywania dyfuzyjnych pokryć metodą proszkową jest następująca :
- ❖ dokładne mieszanie składników mieszaniny
- ❖ nasypanie na dno kontenera warstwy proszku o grubości 20-30 mm
- ❖ ułożenie pokrywanych elementów zasypując je proszkiem w taki sposób aby nad
- ❖ detalami znajdowała się warstwa proszku o grubości 20-30 mm
- ❖ zamykanie kontenera pokrywką
- ❖ uszczelnienie pojemnika w celu zamknięcia dostępu powietrza z atmosfery.
- ❖ Realizowane jest to poprzez zakrycie szkłem ołowiowym lub przez stosowanie atmosfer ochronnych (argon, wodór)

Kinetyka procesu aluminiowania – proces nisko- i wysokoaktywny

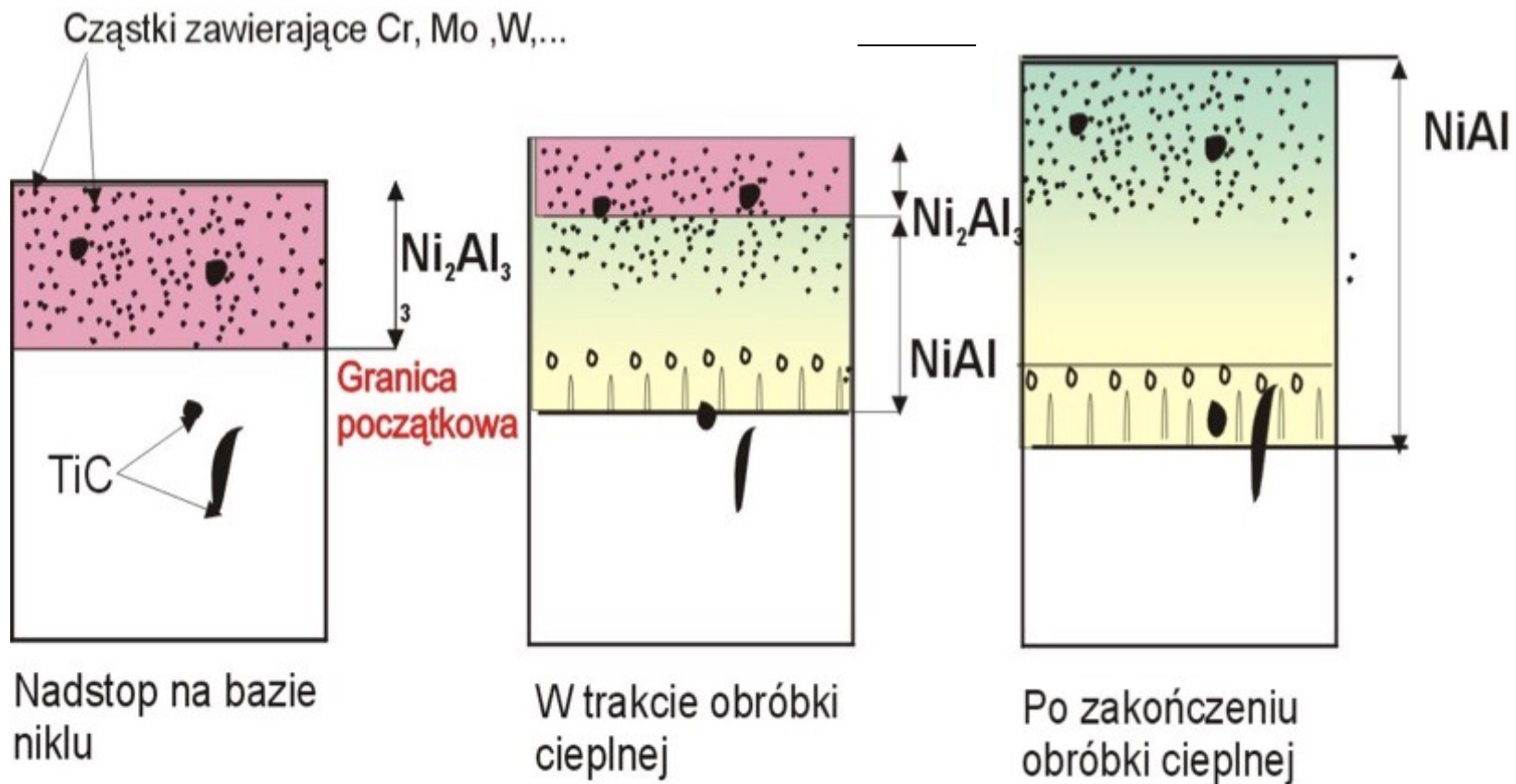


Warstwa utworzona w wyniku dordzeniowej dyfuzji aluminium – proces wysokoaktywny

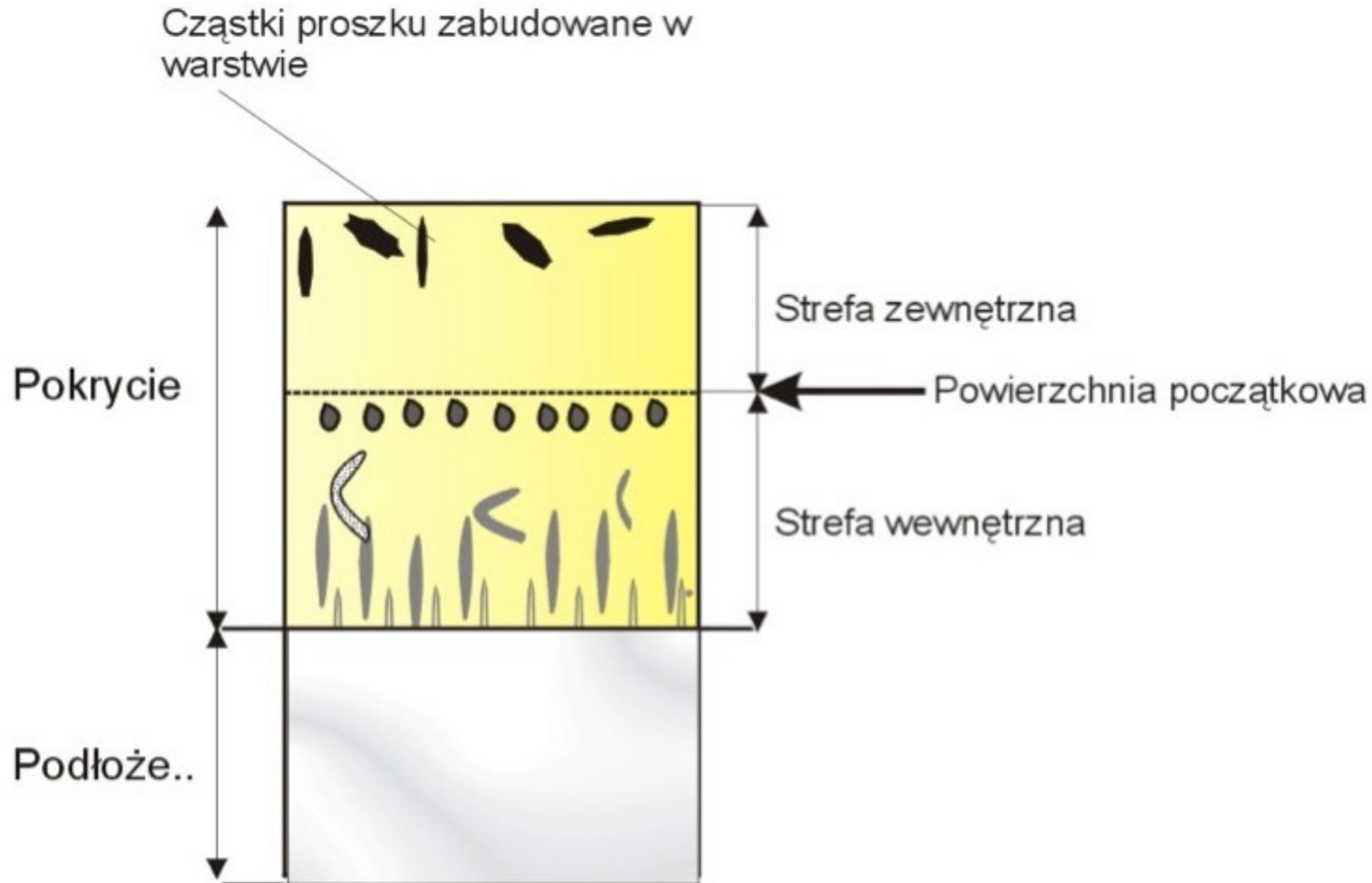


Warstwa utworzona w wyniku odrdzeniowej dyfuzji niklu – proces niskoaktywny

Schemat tworzenia się warstwy aluminidkowej na podłożu nadstopu niklu w wyniku przeważającej dordzeniowej dyfuzji aluminium – proces wysokoaktywny



Schemat tworzenia się warstwy aluminikowej na podłożu nadstopu niklu w wyniku przeważającej odrdzeniowej dyfuzji niklu – proces niskokoaktywny



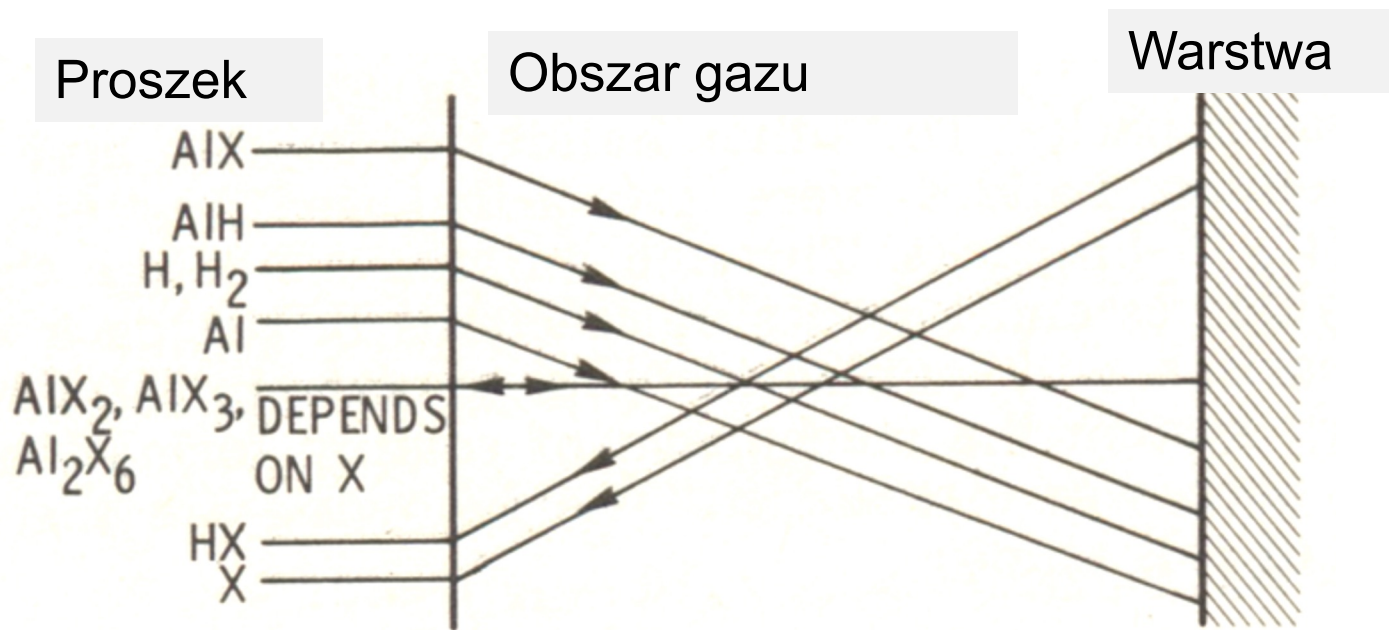
Ważne cechy procesu

1. **Aluminium jest transportowane do powierzchni poprzez pary halogenku**
2. **W wyniku reakcji na powierzchni powstają fazy międzymetaliczne układu Ni-Al**
3. **Dostarczanie aluminium do powierzchni podłoża- nadstopu zależy od ilości dostępnego niklu. Reakcje te nazywane są „reakcjami samowyrównywania”**
4. **Proces osadzania w wyniku bezpośredniego kontaktu (np. topienie aluminium)**

Wady metody kontaktowo-gazowej

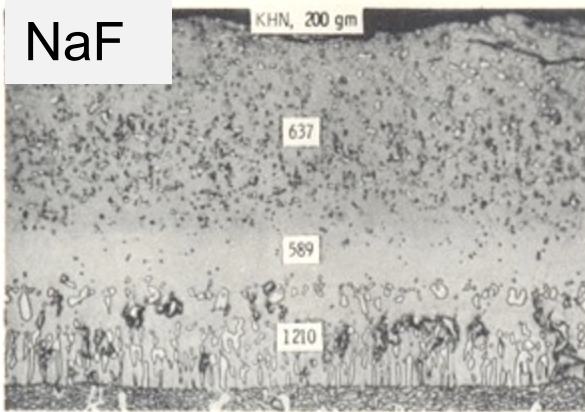
1. Niska przewodność cieplna proszku (Al_2O_3) - długi czas nagrzewania i chłodzenia
2. Duża ilość nagrzewanego wsadu – duże zużycie energii
3. Ograniczenie możliwości obróbki cieplnej stopów
4. Konieczność regeneracji proszku
5. Zagrożenie dla środowiska przez wydzielanie zanieczyszczeń chlorków, fluorków oraz pyłów.
6. Utrudniona możliwość wprowadzenia do składu warstw innych pierwiastków oprócz aluminium (np. Si, Cr)

Reakcje zachodzące w trakcie aluminiowania metodą kontaktowo-gazową

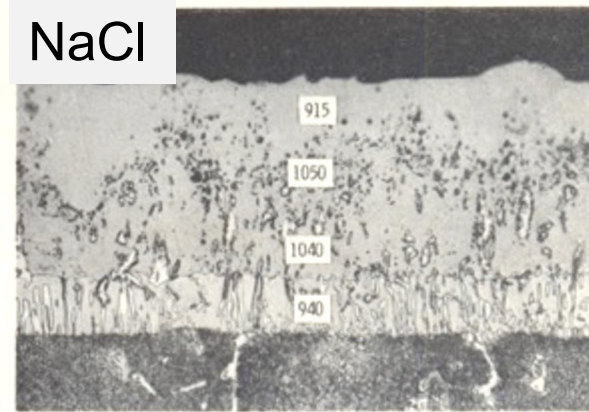


(c) COMPLETE MODEL- NH_4X ACTIVATED PACKS.

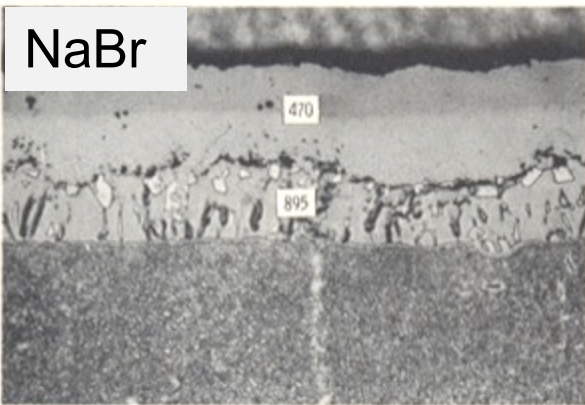
Wpływ aktywatorów na mikrostrukturę warstw aluminidkowych wytworzonych w 1093°C/16h



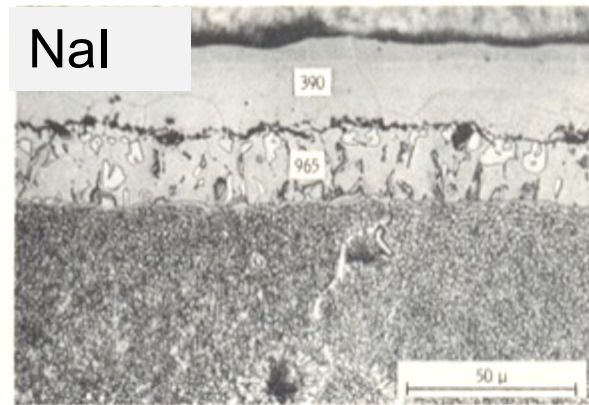
(a) NaF activated pack.



(b) NaCl activated pack.



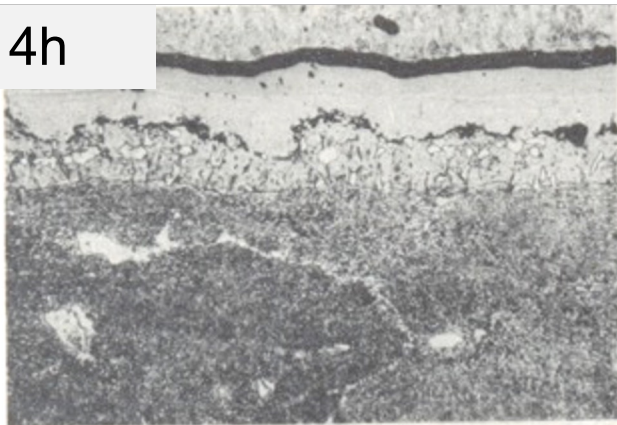
(c) NaBr activated pack.



(d) NaI activated pack.

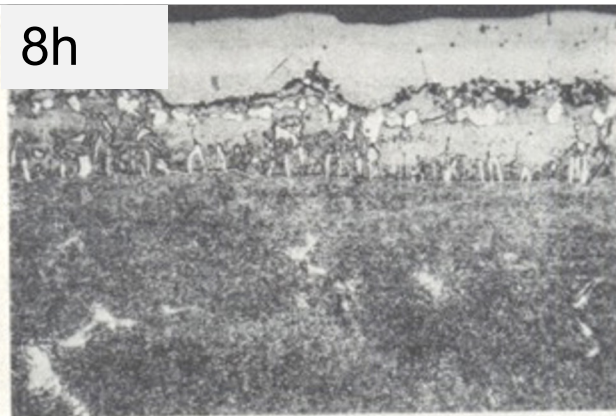
Wpływ czasu na mikrostrukturę warstw aluminidkowych wytworzonych w 1093°C na podłożu stopu IN 100, aktywator NaBr

4h



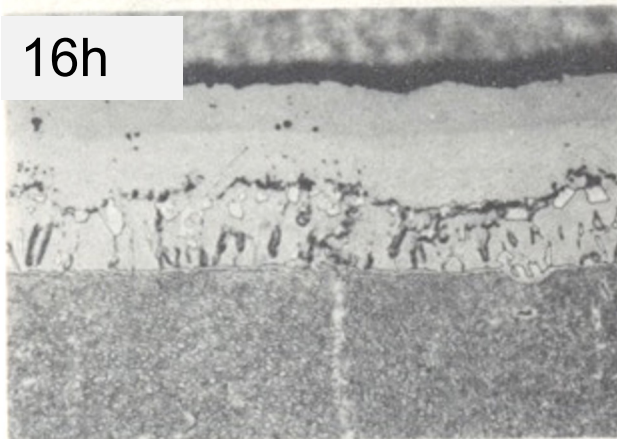
(a) 4 Hour pack.

8h



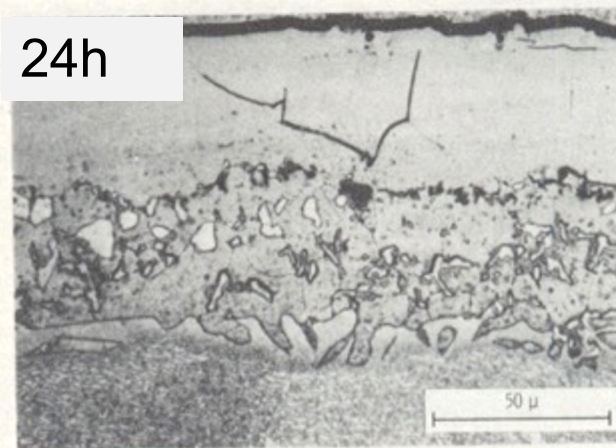
(b) 8 Hour pack.

16h



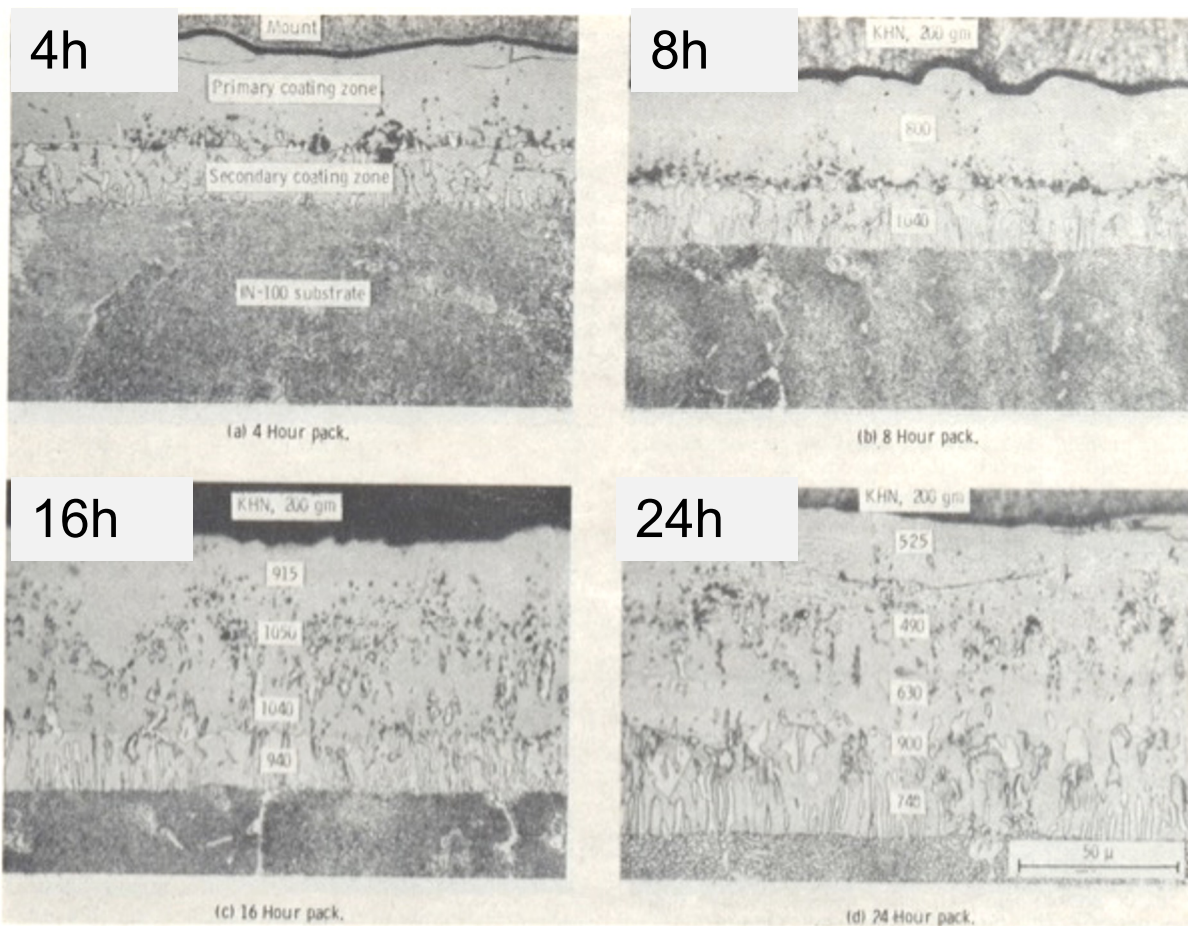
(c) 16 Hour pack.

24h

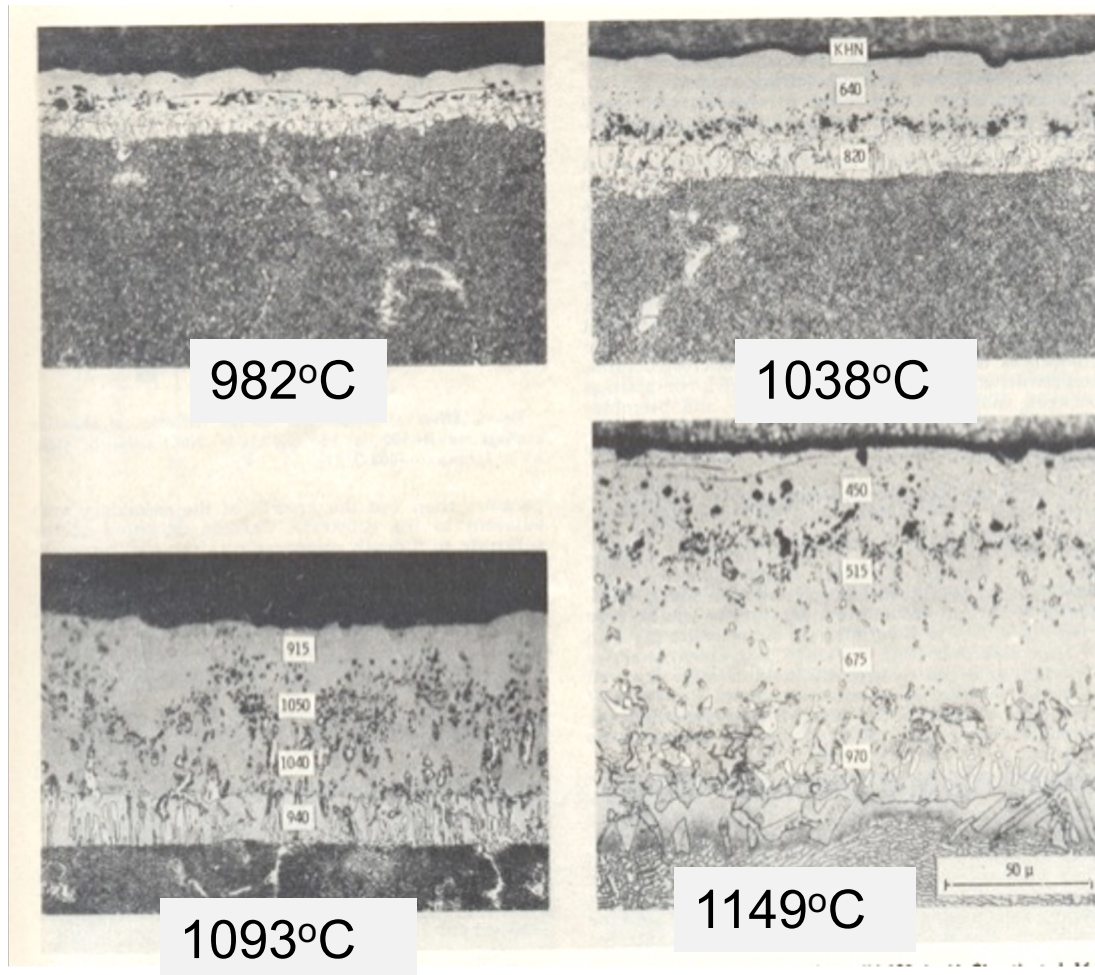


(d) 24 Hour pack.

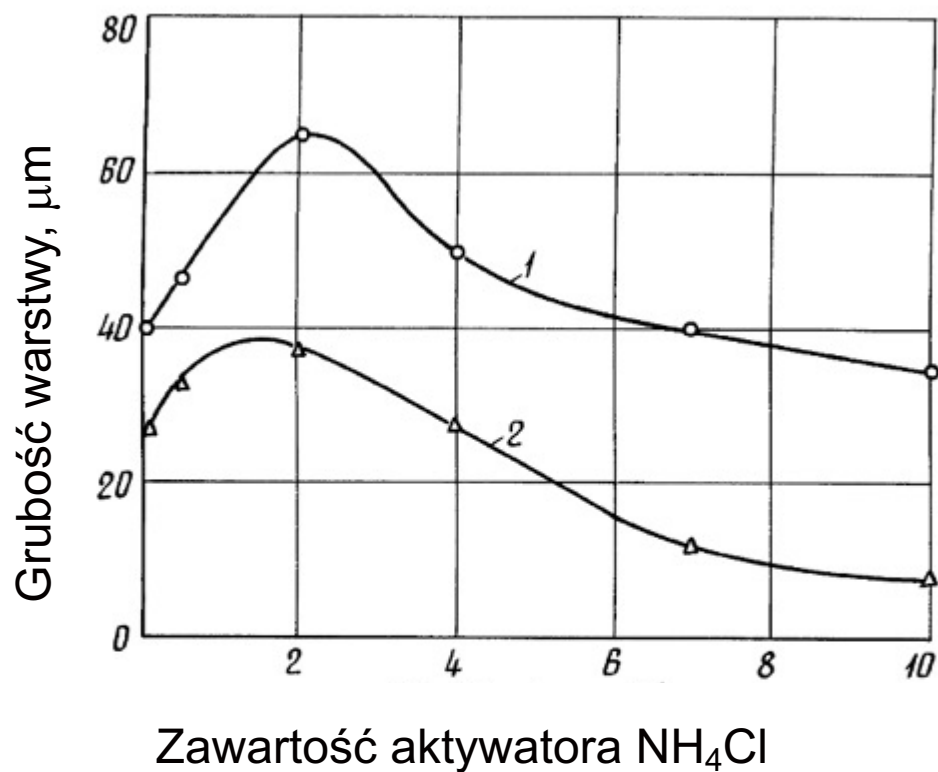
Wpływ czasu na mikrostrukturę warstw aluminiowych wytworzonych w 1093°C na podłożu stopu IN 100, aktywator NaCl



***Wpływ temperatury na mikrostrukturę warstw
aluminidkowych wytworzonych na podłożu stopu IN
100, aktywator NaCl, czas 16h***

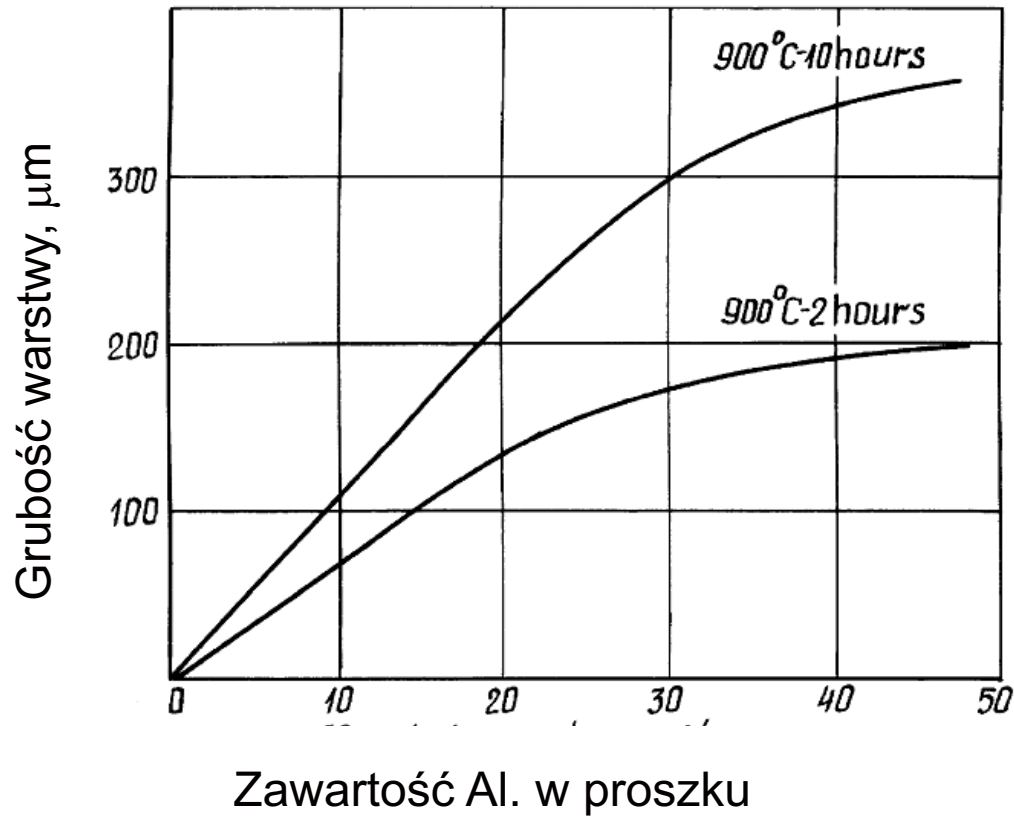


Wpływ ilości aktywatora na grubość warstwy aluminikowej



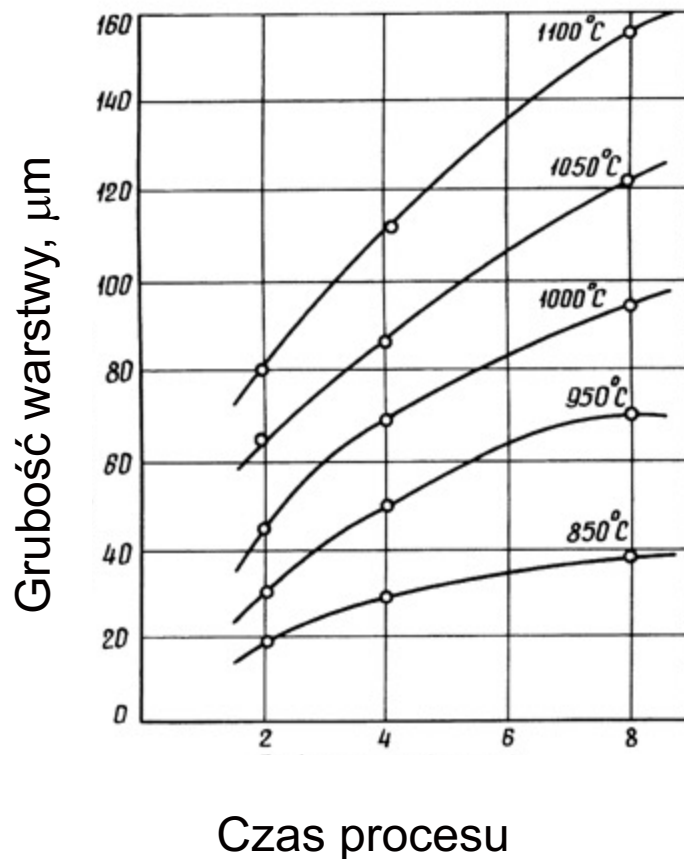
Warunki procesu: proszek Al.-Fe (50-50),
temp. 950°C , czas 4h

Wpływ ilości aluminium w proszku na głębokość warstwy



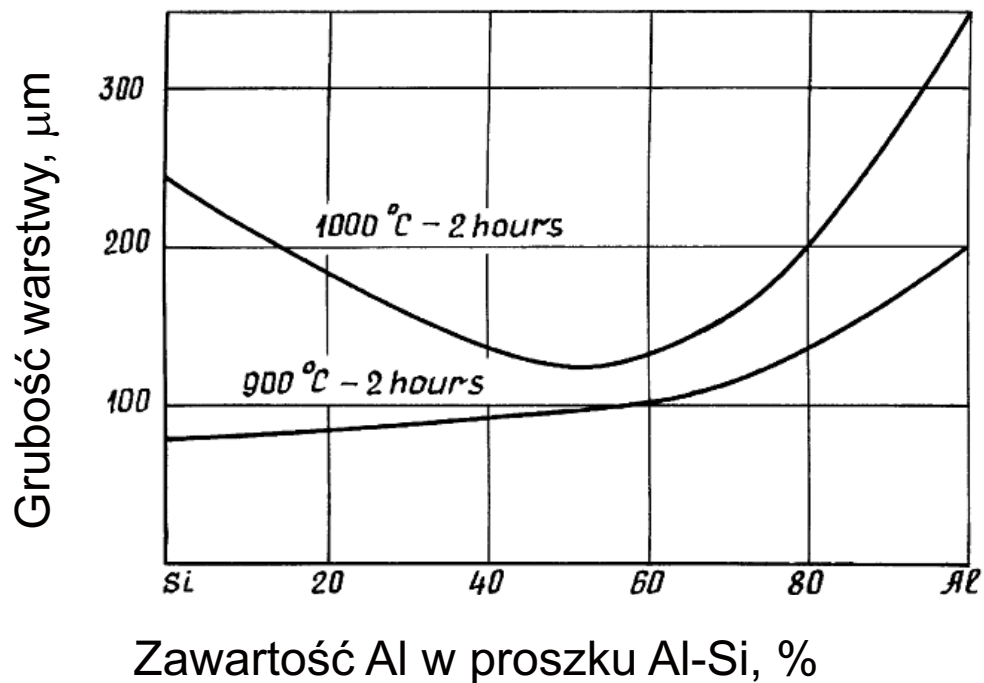
Warunki procesu: proszek Al_2O_3 -5% NH_4Cl ,
temp. 900°C,

Kinetyka wzrostu warstwy aluminidkowej



Warunki procesu: 98% proszek Al-Fe (50-50), Aktywator NH_4Cl (2% mas.), czas 4h

Wpływ zawartości aluminium i krzemu w proszku na głębokość warstwy

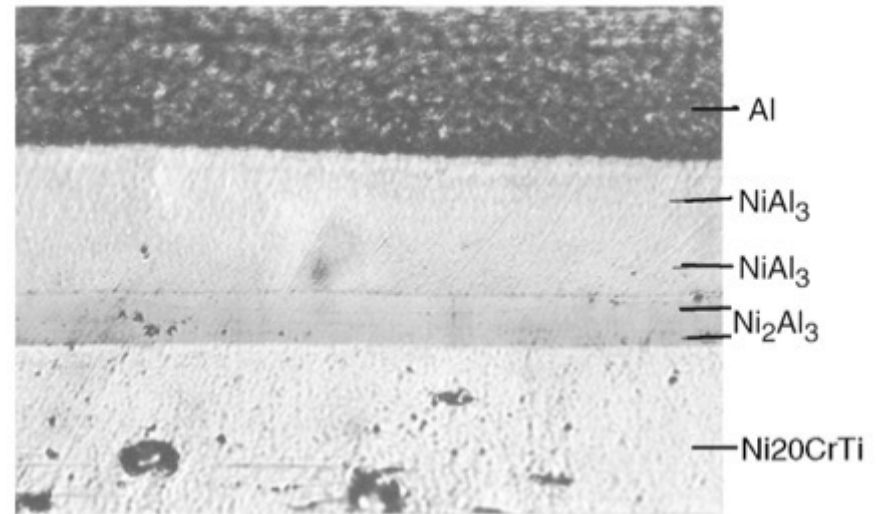
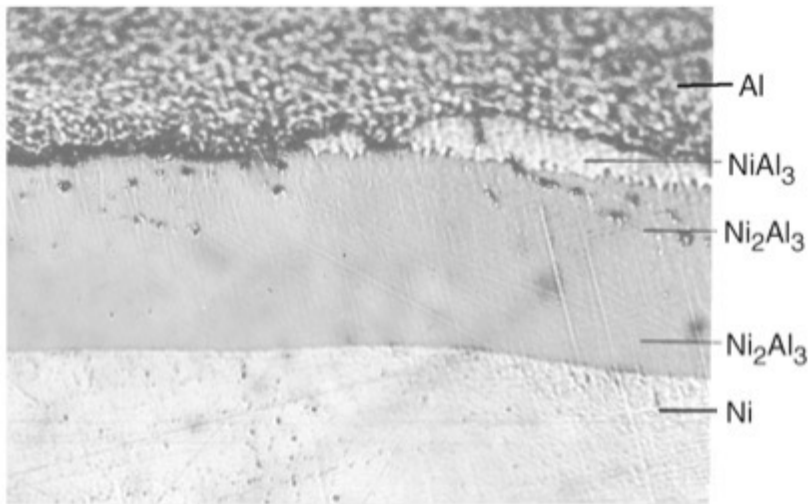


Warunki procesu: proszek Al-Si 50%, Al₂O₃ (45%), NH₄Cl (5%), temp. 950°C, czas 4h

Klasyfikacja aktywności procesów aluminiowania

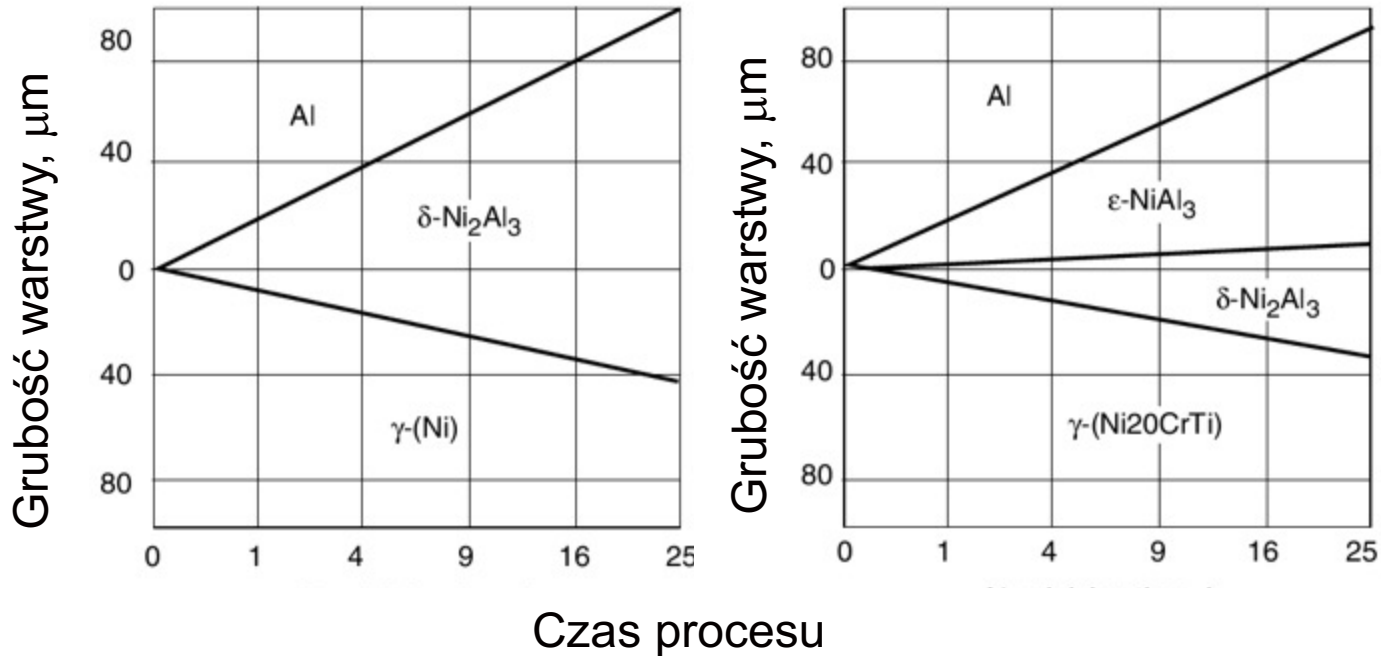
| <i>Aktywność źródła aluminium</i> | <i>Fazy tworzące się w strefie zewnętrznej warstwy aluminidkowej, zawartość Al w strefie zewnętrznej (%)</i> |
|--|---|
| Wysoka | $\text{NiAl}_3, \text{Ni}_2\text{Al}_3$; >40% Al |
| Średnia | NiAl ; 32-38 % Al |
| Niska | $\text{NiAl}, \text{NiAl} + \text{Ni}_3\text{Al}$; <31% Al |

Wpływ składu chemicznego podłoża na mikrostrukturę warstwy aluminikowej



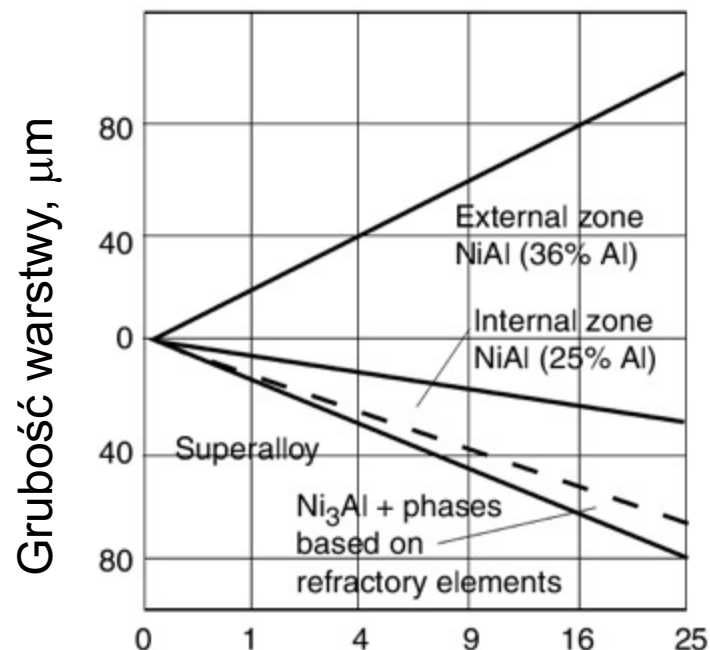
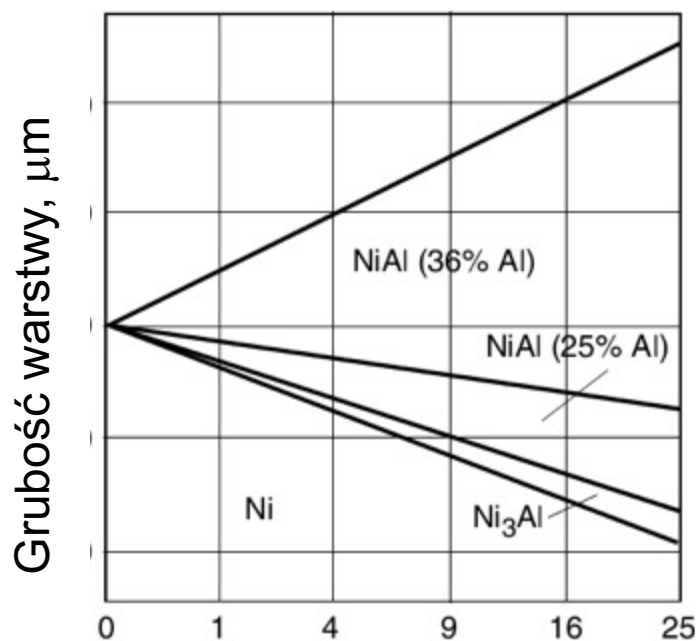
Aluminiowanie w temp. 600°C, czas 9h, pow. 363x

Wpływ składu chemicznego podłoża na mikrostrukturę warstwy aluminidkowej



Aluminiowanie w temp. 600°C,
a) podłoże Ni, b) podłoże Ni20CrTi

Mikrostruktura warstwy aluminidkowej na podłożu niklu oraz żarowytrzymałego nadstopu niklu wytworzonych w tych samych warunkach – przemiany fazowe



Czas procesu

Aluminiowanie w temp. 1000°C,
a) podłoże Ni, b) podłoże ŻS6U

Aluminiowanie
metodą
gazową bezkontaktową
Out of pack
Vapour Phase aluminizing (VPA)

***ALUMINIOWANIE
METODĄ
GAZOWĄ
BEZKONTAKTOWĄ
OUT OF PACK
VAPOUR PHASE
ALUMINIZING (VPA)***

Założenia metody gazowej

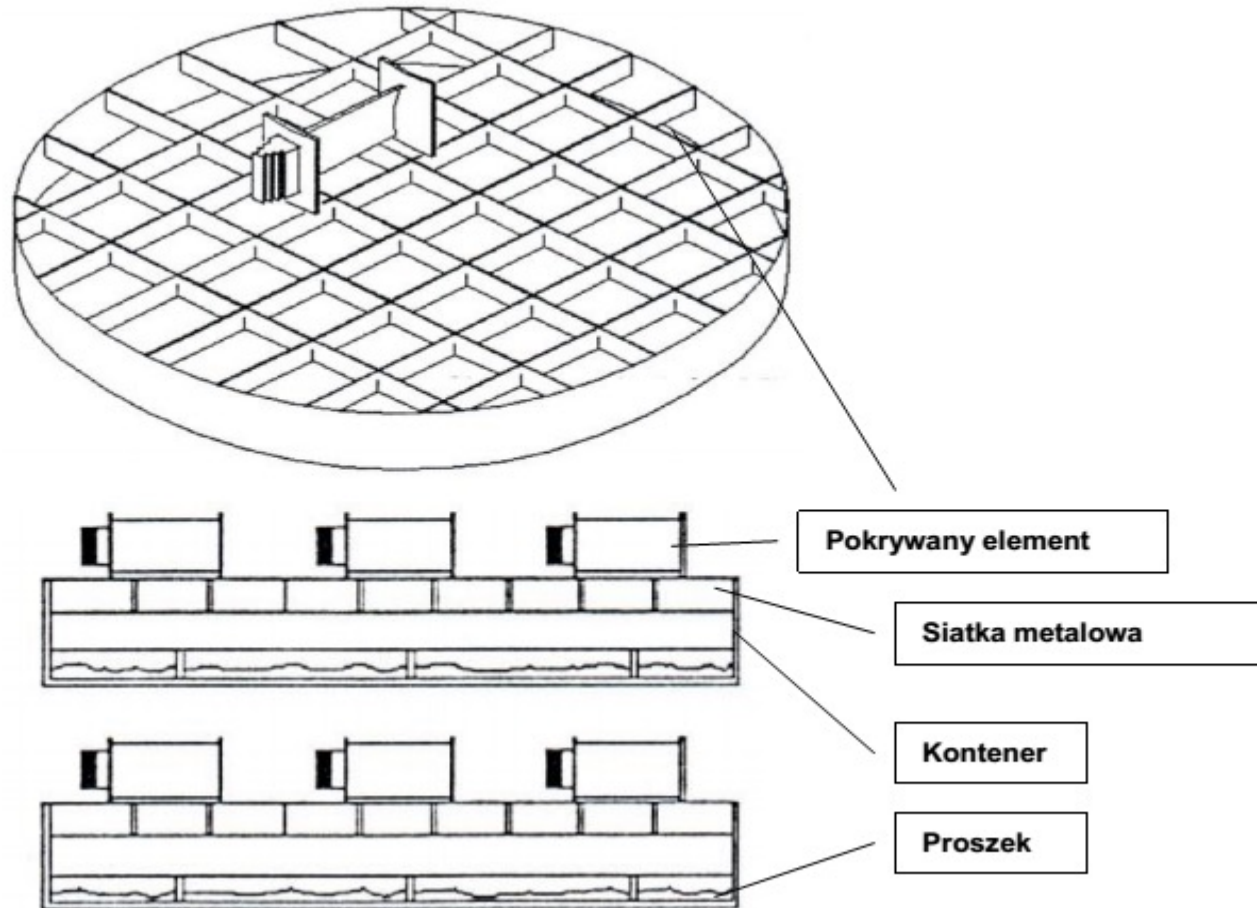
- Jest rozwinięciem metody kontaktowo – gazowej
- Podstawowym założeniem tej metody jest **oddzielenie pokrywanych elementów od mieszaniny proszkowej.**
- Części umieszcza się na perforowanej siatce metalowej nad mieszaniną albo wieszka na drutach nad proszkiem

Metoda Gazowa Bezkontaktowa („out of pack”)

Założenia procesu:

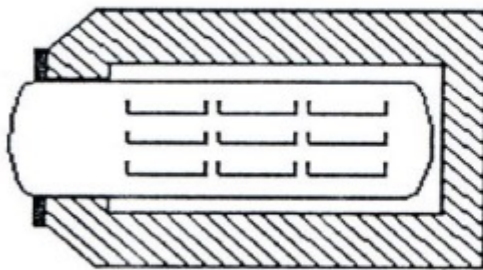
1. Proszek nie zawiera tlenku aluminium przez co szybkość nagrzewania i chłodzenia może być dowolnie regulowana z możliwością obróbki cieplnej po aluminiowaniu
2. Brak kontaktu pomiędzy proszkiem a elementami daje bardzo dobrą jakość powierzchni
3. Fizyczna forma i wielkość ziarn proszku nie wpływają na wynik procesu
4. Korzystnym aktywatorem w metodzie gazowej bezkontaktowej jest AlF_3
5. Proces prowadzony jest w atmosferze argonu lub pod obniżonym ciśnieniem
6. Ważnymi parametrami w procesie są: ciśnienie w retorcie, temperatura oraz odległość elementów od źródła Al

Założenia metody gazowej

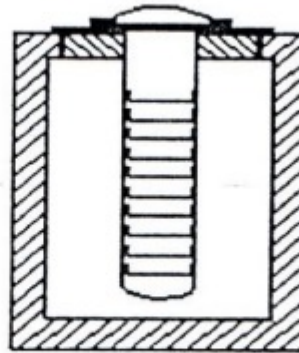


Założenia metody gazowej VPA

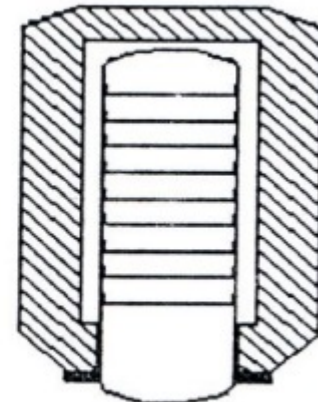
- ❖ Kontener wraz z elementami umieszczany jest w szczelnym reaktorze – retorce zwykle o kształcie walca, zaś samą retortę umieszcza się w piecu. Piec z retortą może być w układzie poziomym lub pionowym (kołpakowy, szybowy)
- ❖ W celu zabezpieczenia procesu przed utlenianiem stosuje się obniżone ciśnienie oraz atmosferę ochronną



HORIZONTAL

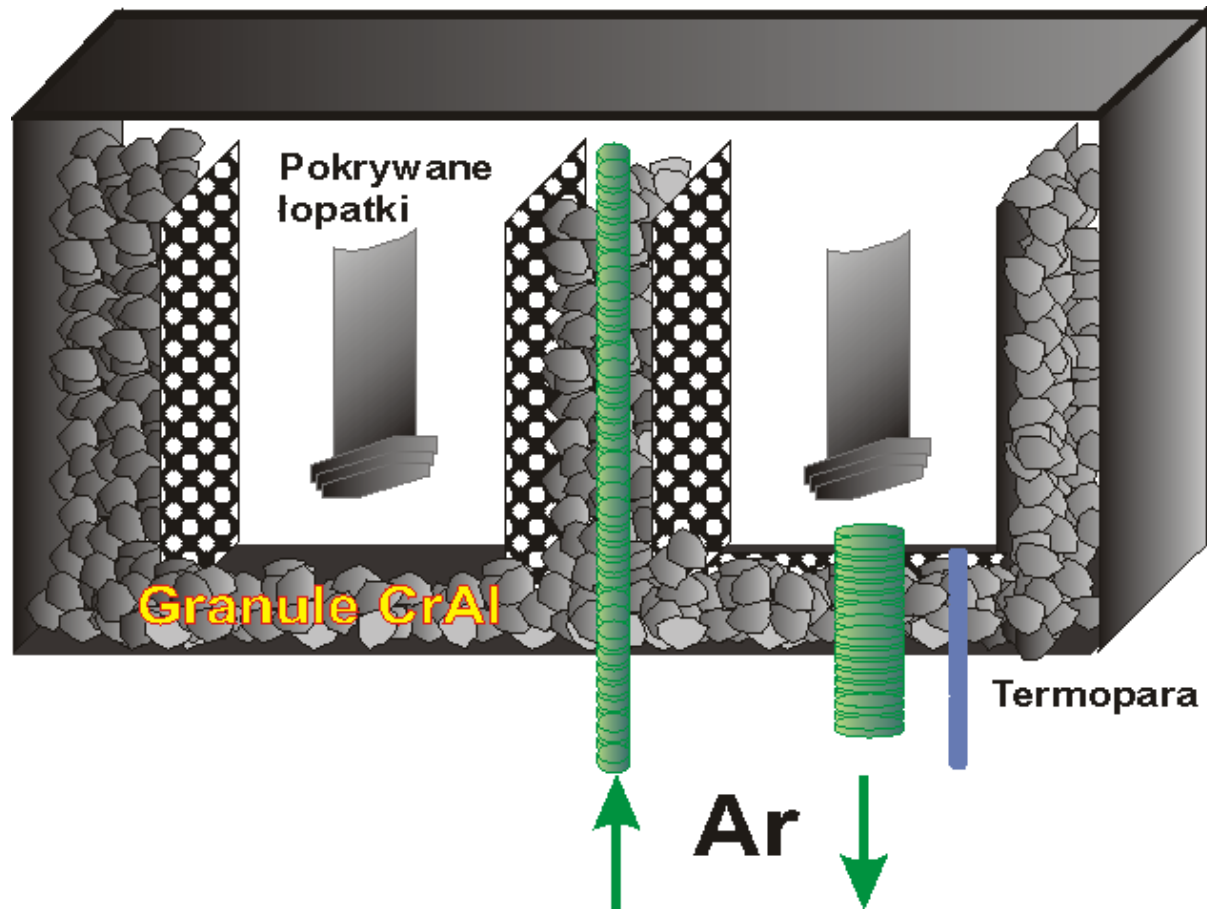


PIT



BELL

Zasada metody gazowej VPA



Istota procesu aluminiowania metodą gazową VPA

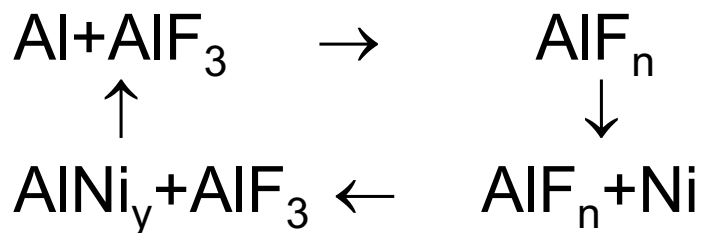
Materiały:

Proszki/Granule: Al+Al₂O₃, NiAl, CrAl, AlSi, ...,

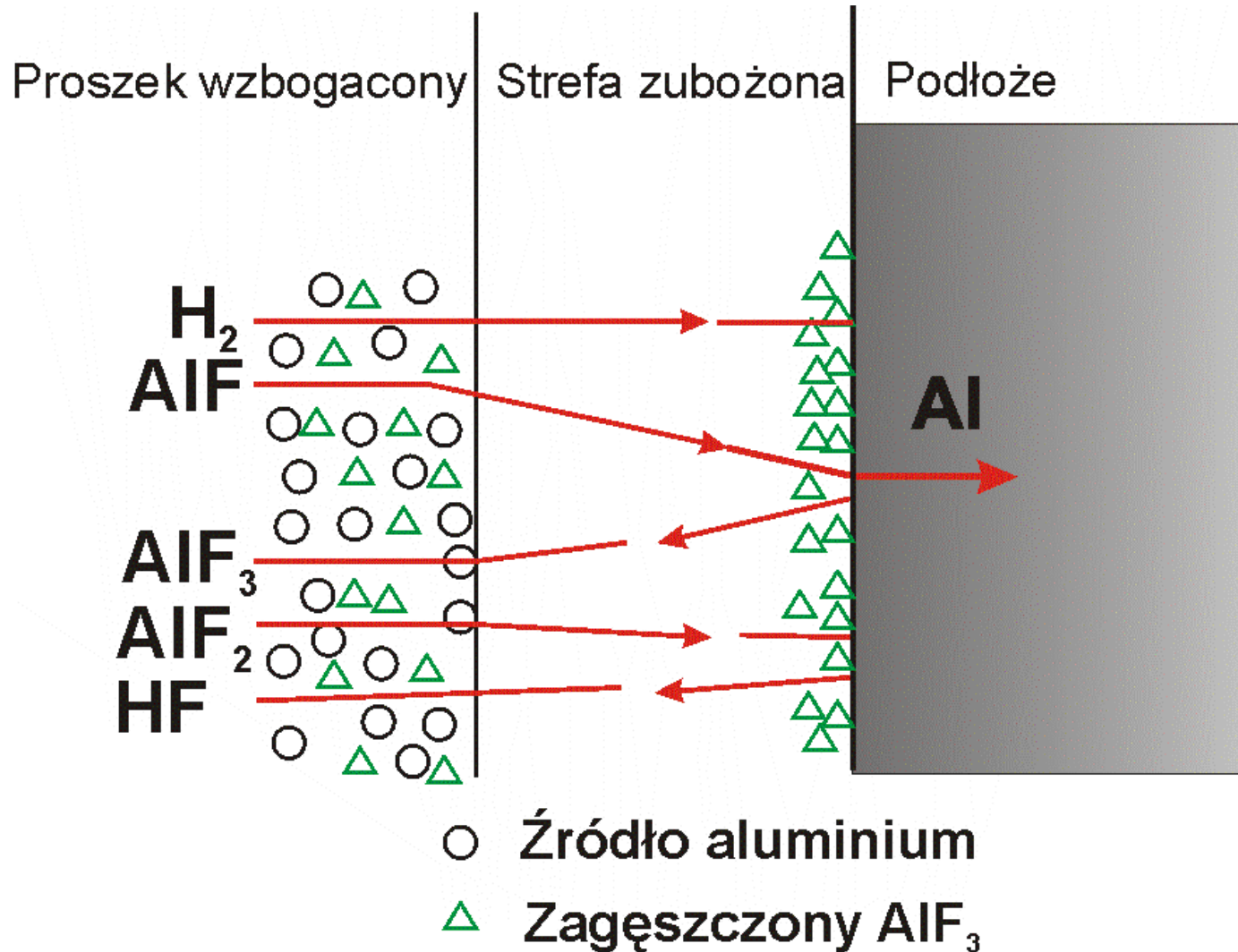
Aktywator: NH₄F lub AlF₃

Przebieg reakcji :

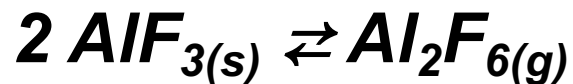
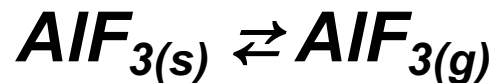
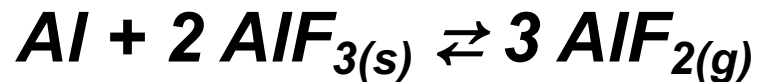
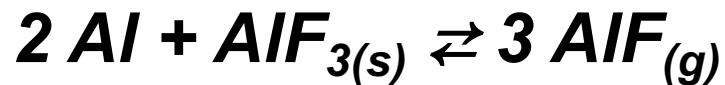
Aluminiowanie z proszku Al-aktywator AlF₃



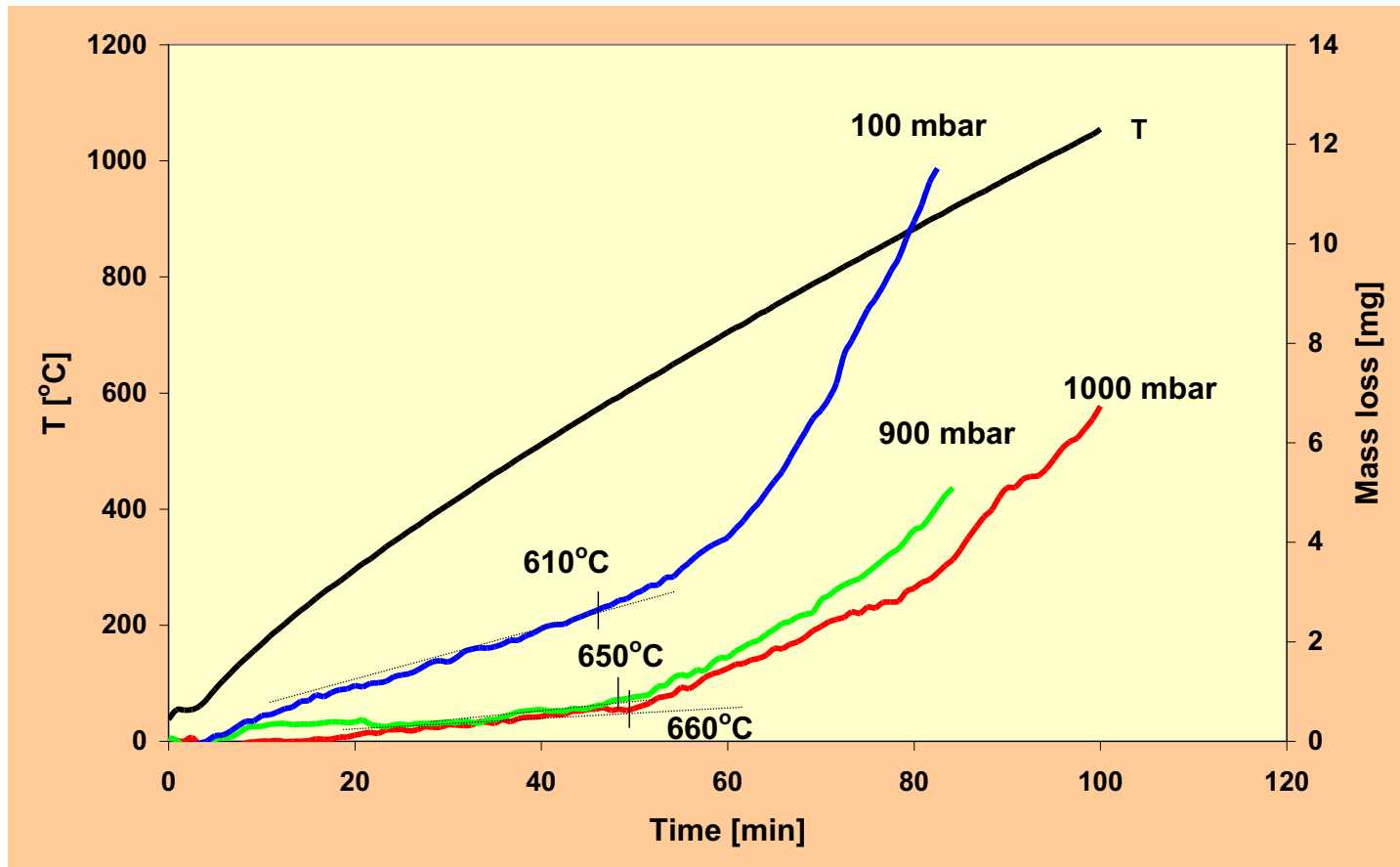
Istota procesu aluminiowania metodą gazową VPA



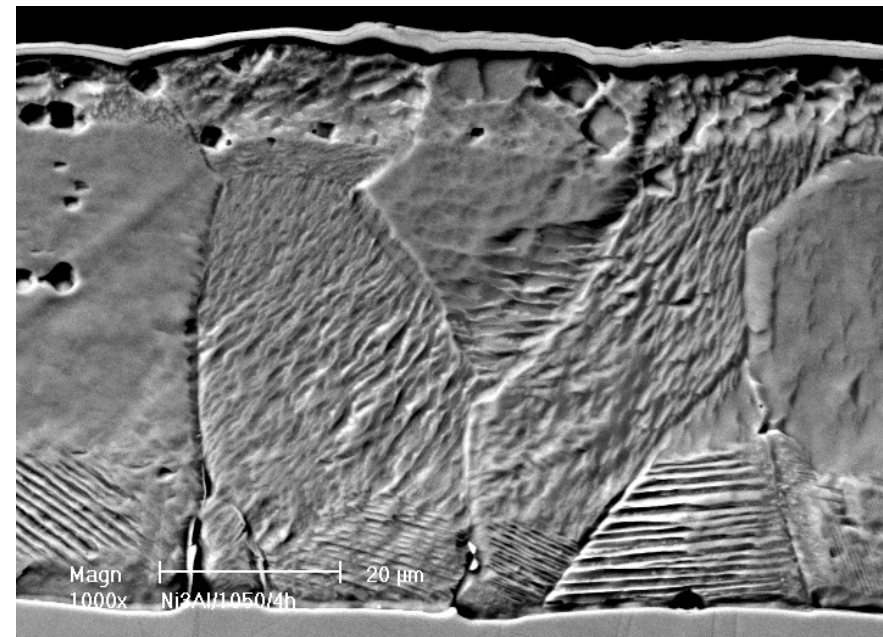
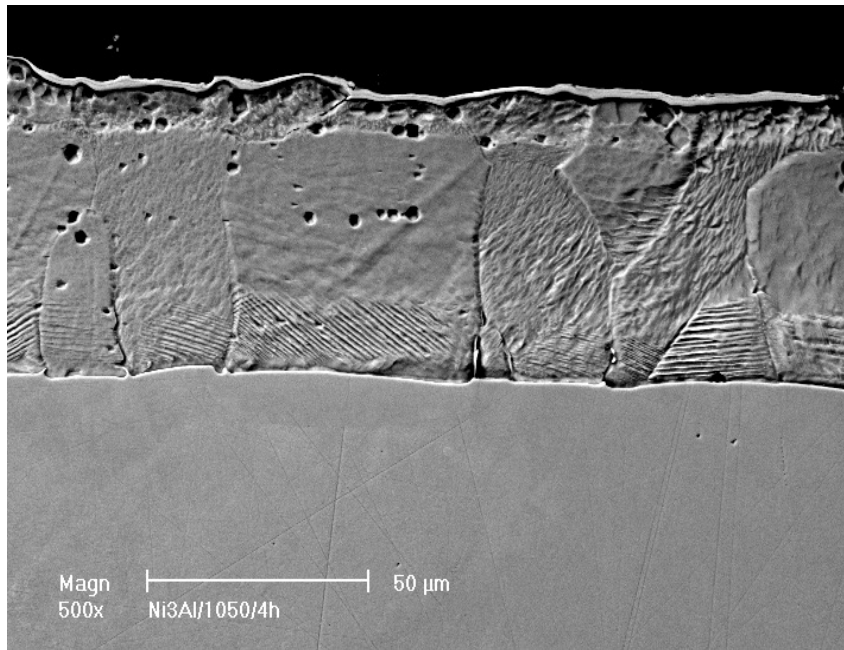
Reakcje chemiczne zachodzące w trakcie aluminiowania metodą gazową



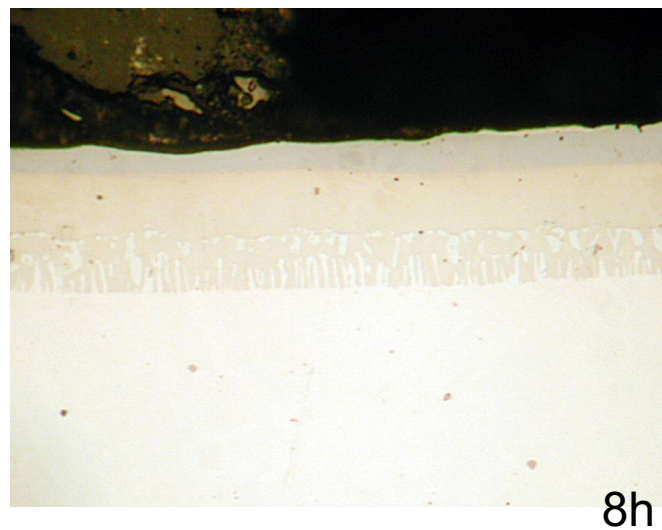
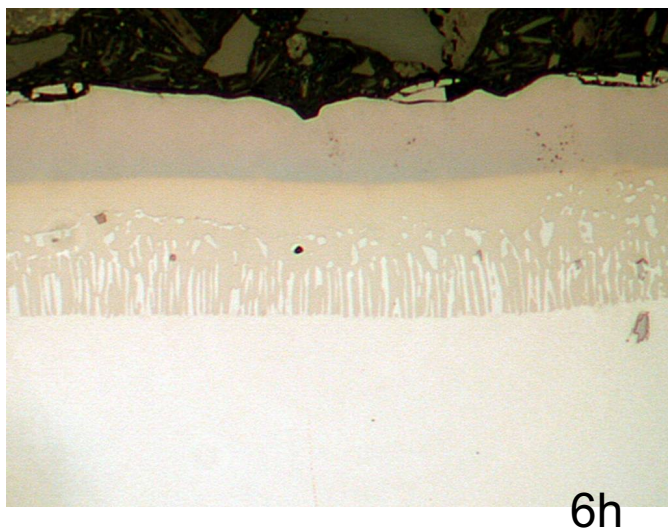
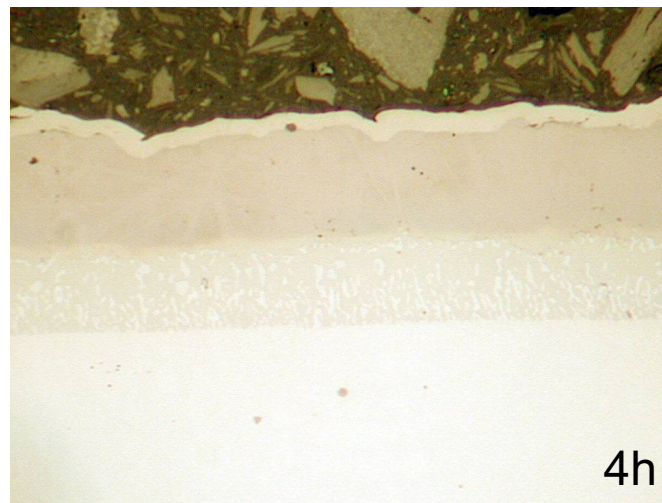
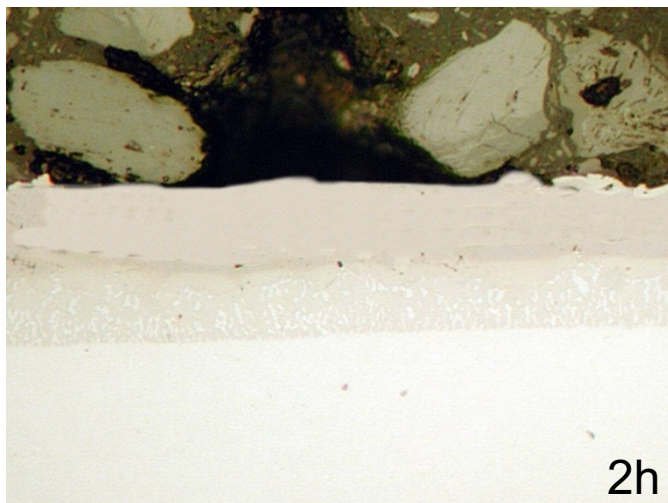
Istota procesu aluminiowania metodą gazową VPA - badania grawimetryczne aktywatora AlF_3



Mikrostruktura warstwy aluminidkowej wytworzonej na podłożu fazy Ni_3Al



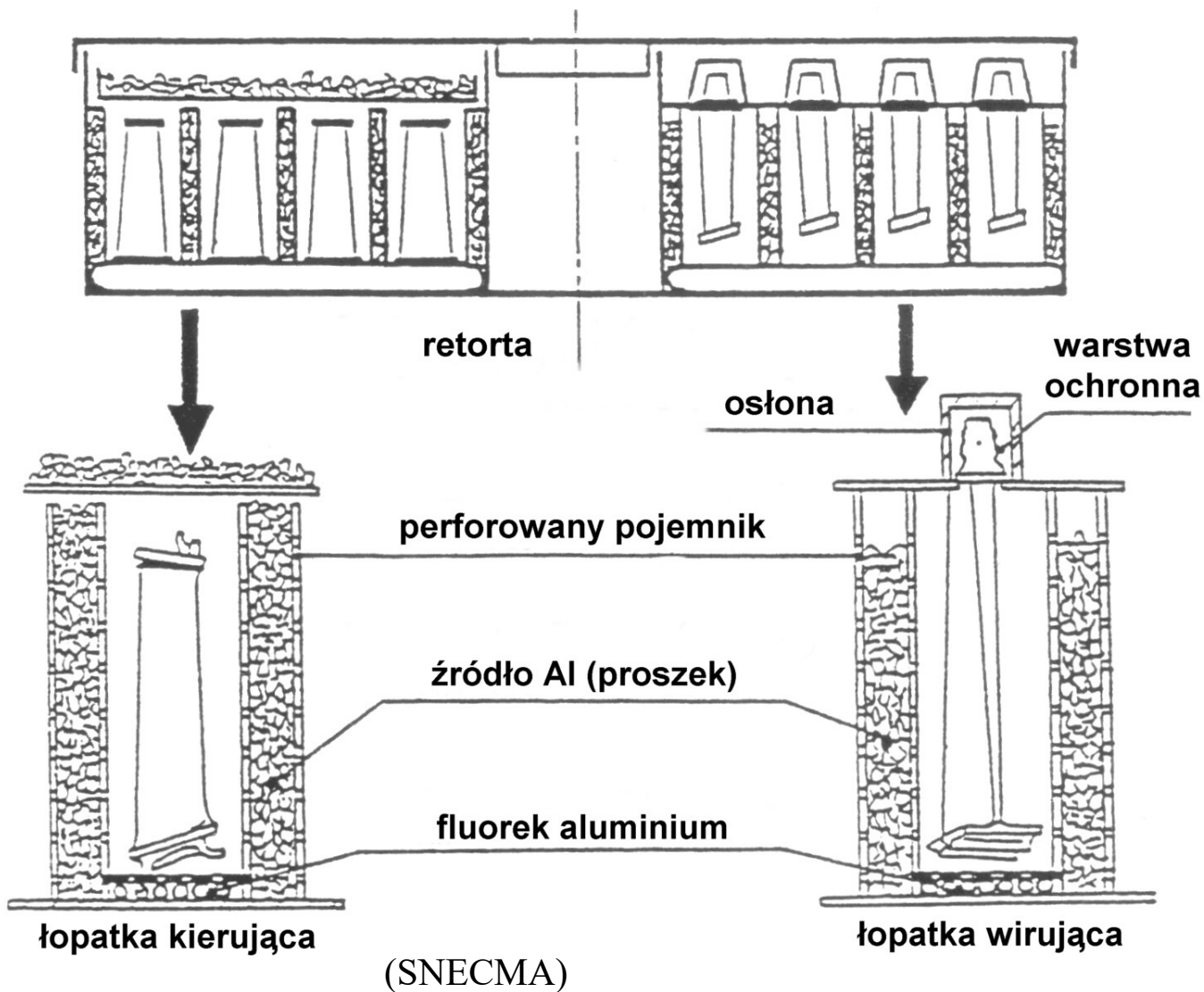
Kinetyka wzrostu warstwy – wpływ czasu aluminiowania



Przebieg aluminiowania w procesie gazowym bezkontaktowym

- ❖ przygotowanie mieszaniny składników do pokrywania i dodanie aktywatora
- ❖ umieszczenie proszku na dnie kontenera
- ❖ umieszczenie detali na siatce
- ❖ ułożenie kontenera w retorcie pieca
- ❖ uruchomienie systemu podawania argonu i pomp próżniowych
- ❖ umieszczenie retorty wewnątrz uprzednio nagrzanego pieca
- ❖ schłodzenie retorty po zakończeniu aluminiowania

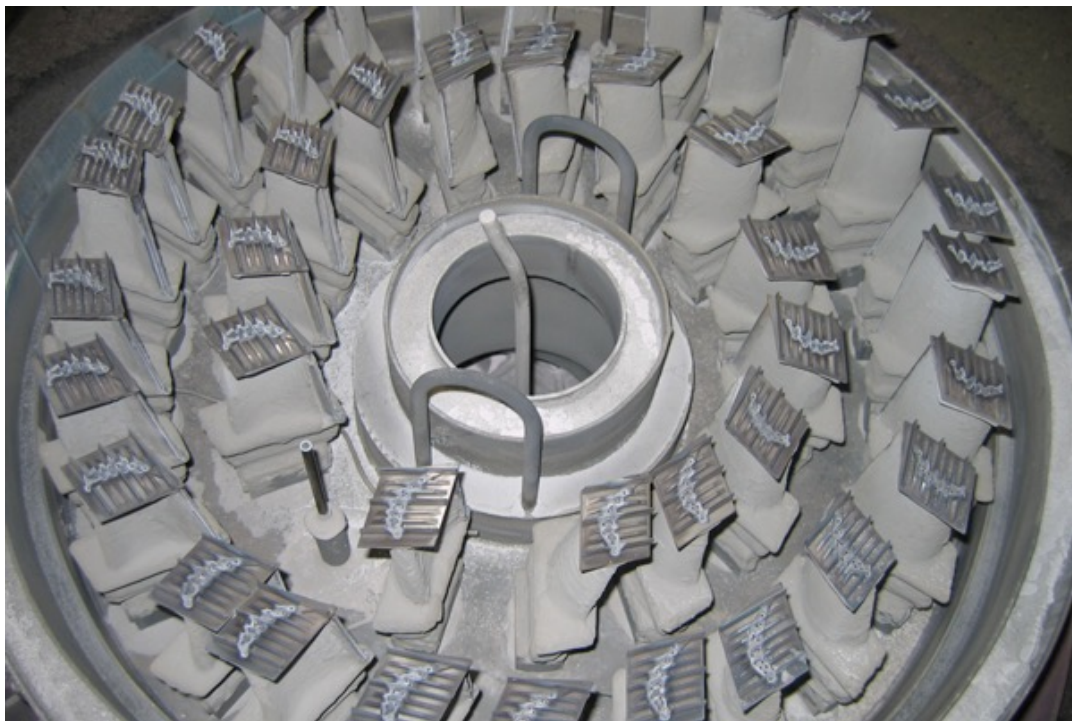
Schemat przemysłowego kontenera do aluminiowania metodą gazową bezkontaktową



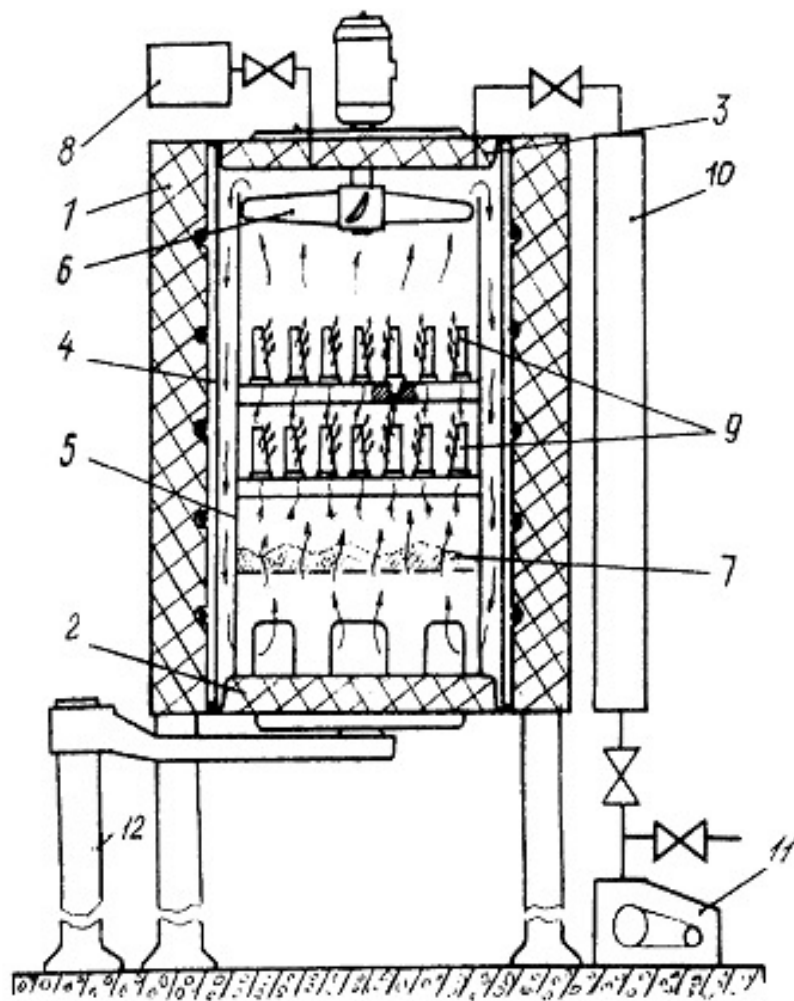
Budowa stanowiska przemysłowego



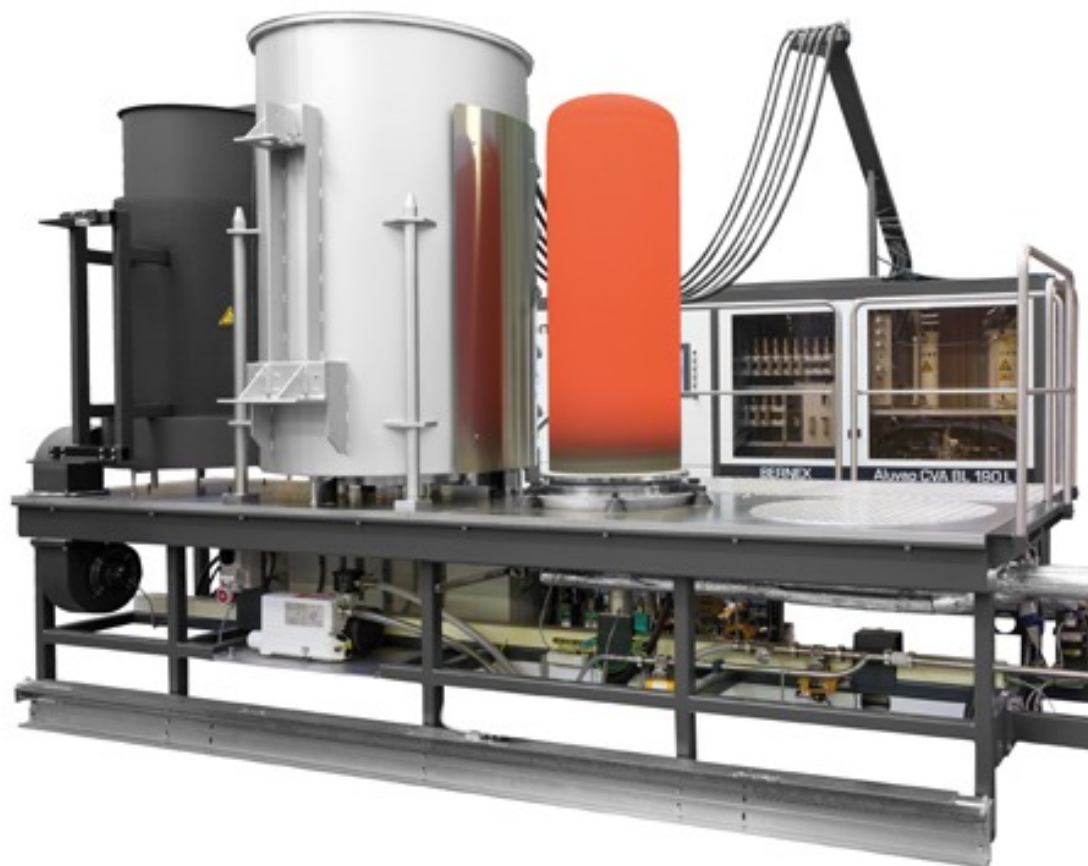
Budowa stanowiska przemysłowego



Stanowisko do metody CVA



Piec do procesu CVA



Rozwiązania techniczne pieców



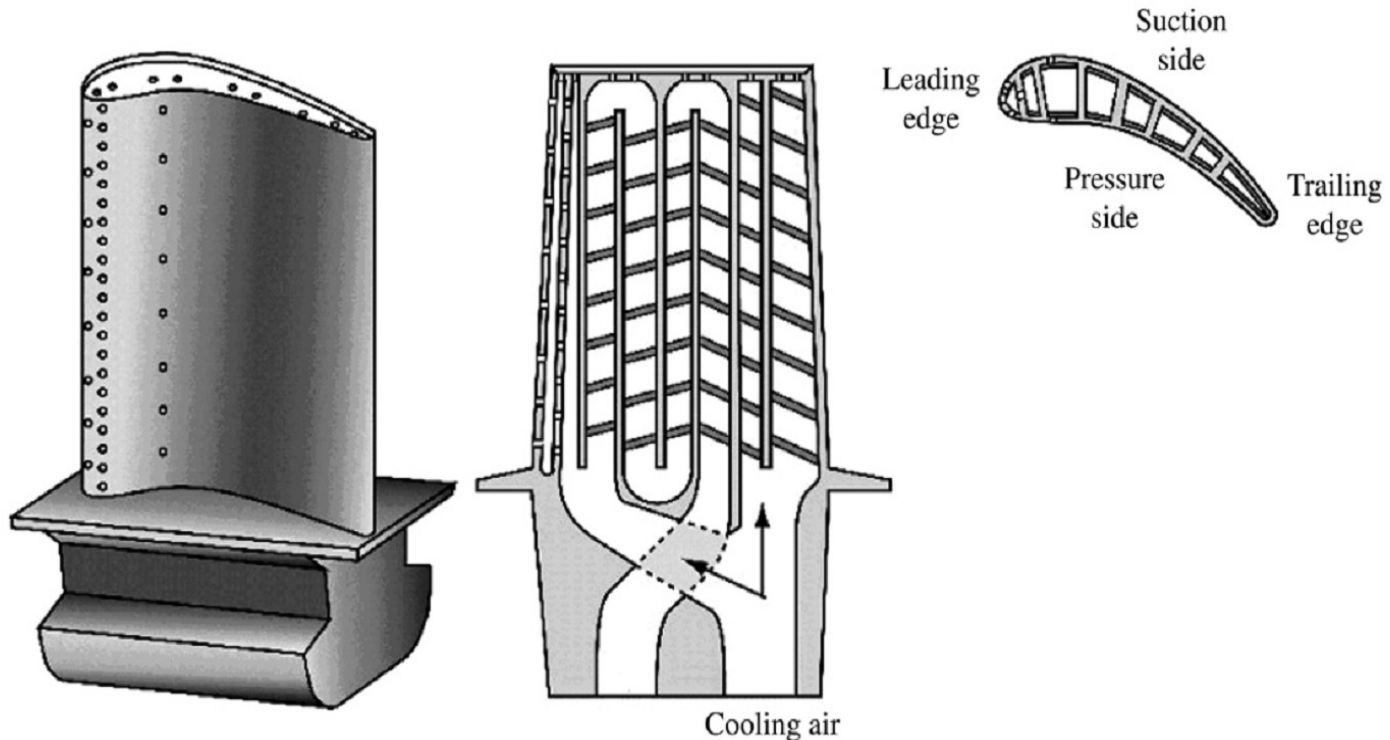
Rozwiązania techniczne pieców

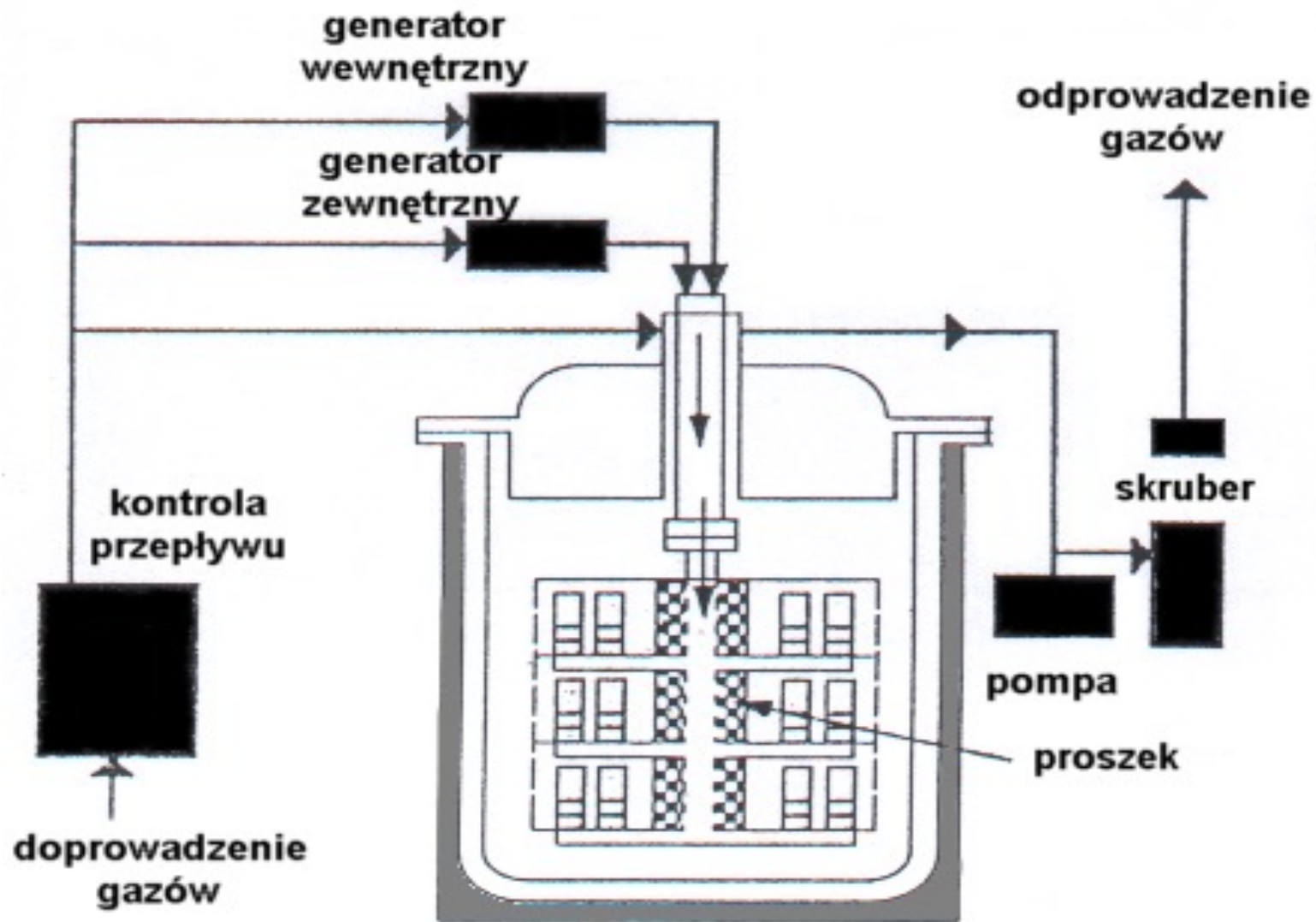


***ALUMINIOWANIE
METODĄ
CHEMICZNEGO
OSADZANIA Z FAZY
GAZOWEJ
CHEMICAL VAPOUR
DEPOSITION
CVD***

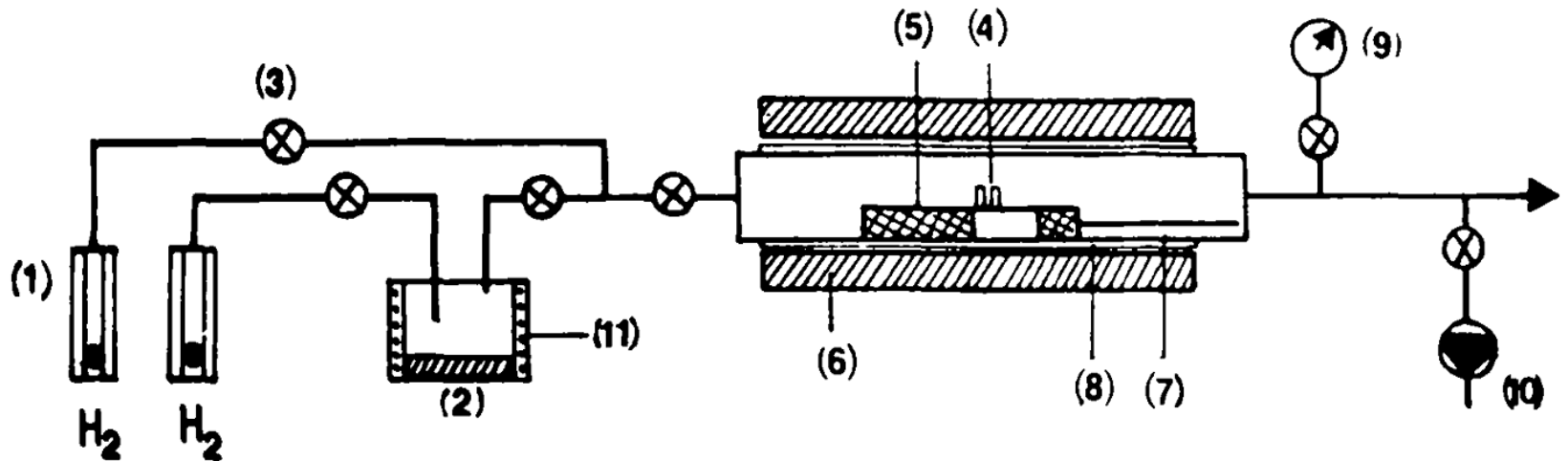
Problem- dlaczego stosuje się metodę CVD ?

Jak aluminiować wewnętrzne kanały chłodzące ?

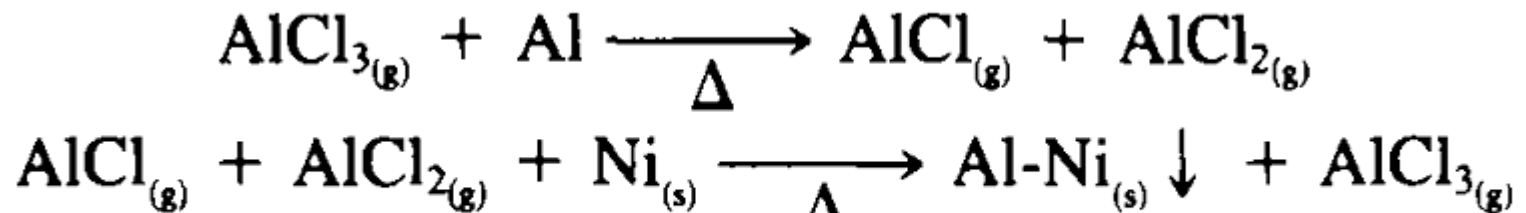




Zasada aluminowania metodą CVD



1-rotametry, 2-reaktor z AlCl_3 , 3-zawór, 4-próbki, 5-proszek $\text{Al} + \text{Al}_2\text{O}_3$, 6-piec, 7-próbki, 8-retorta, 10-pompa, 11-piec



Wpływ temperatury chlorku aluminium oraz temperatury procesu na właściwości warstwy

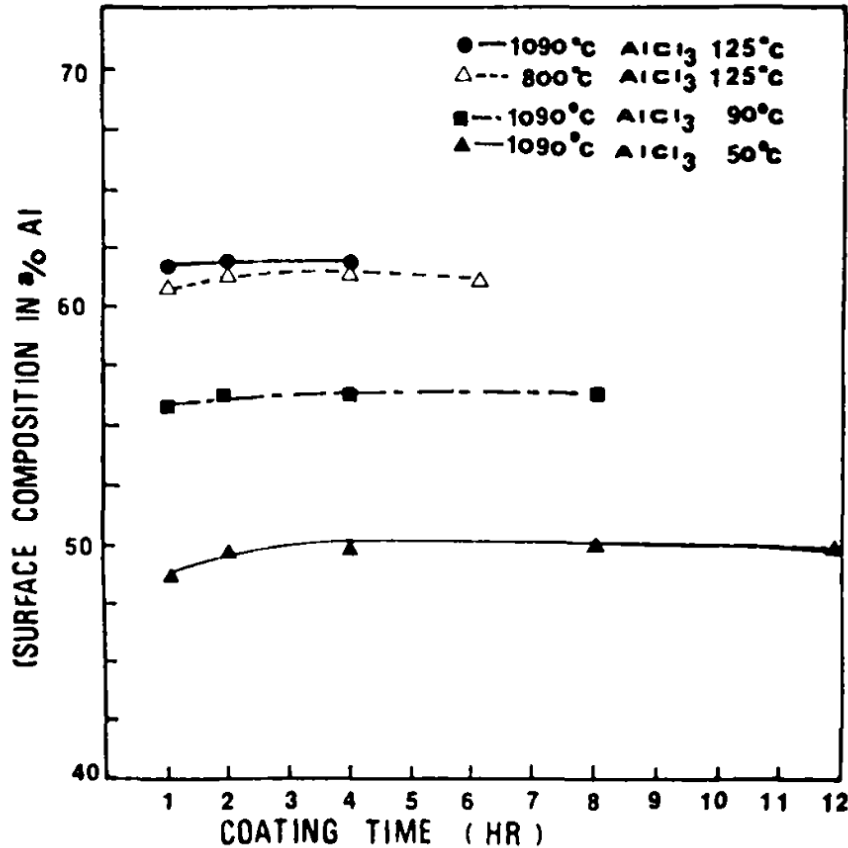


Fig. 2—Variation of surface composition of aluminized Ni specimen with time at 800 °C and 1090 °C.

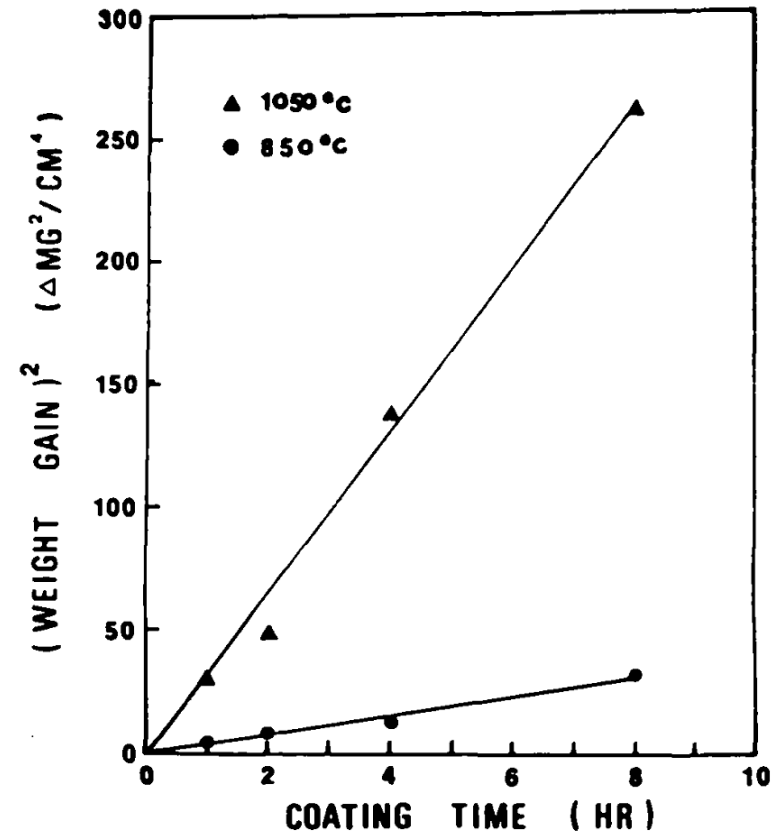


Fig. 3—Parabolic weight gain behavior of Ni during aluminum deposition by the CVD process at 1050 °C and 850 °C (AlCl₃ = 125 °C, H₂ = 300 cc/min).

Wpływ temperatury chlorku aluminium oraz temperatury procesu na właściwości warstwy

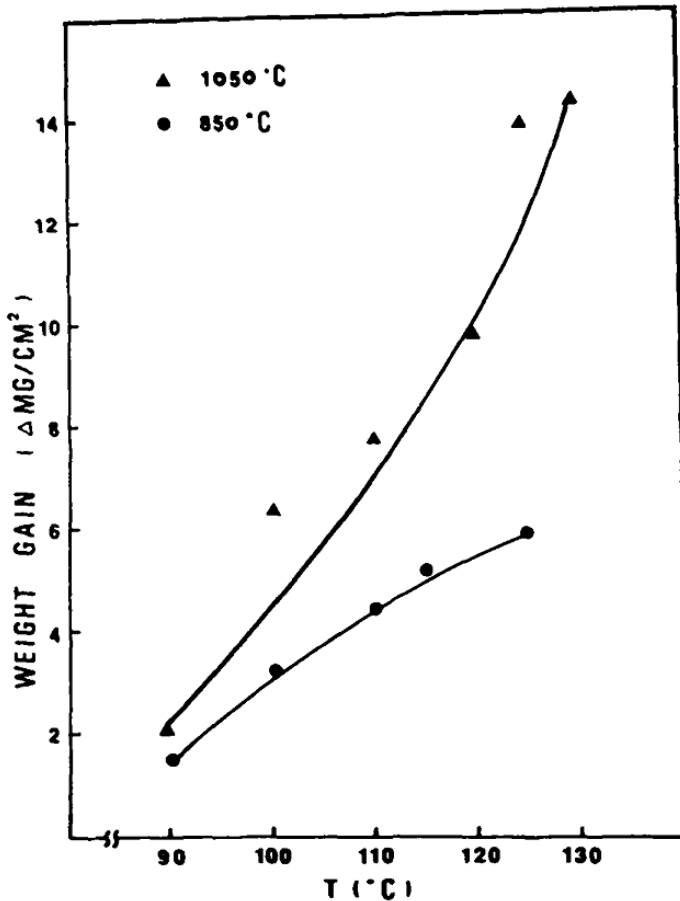


Fig. 4—The CVD aluminization as a function of AlCl₃ temperature.

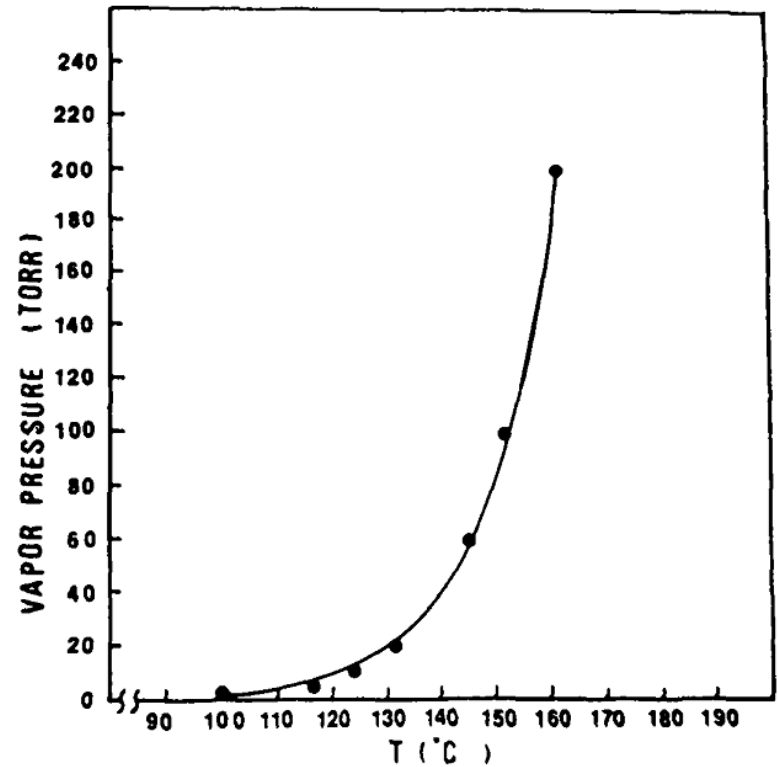
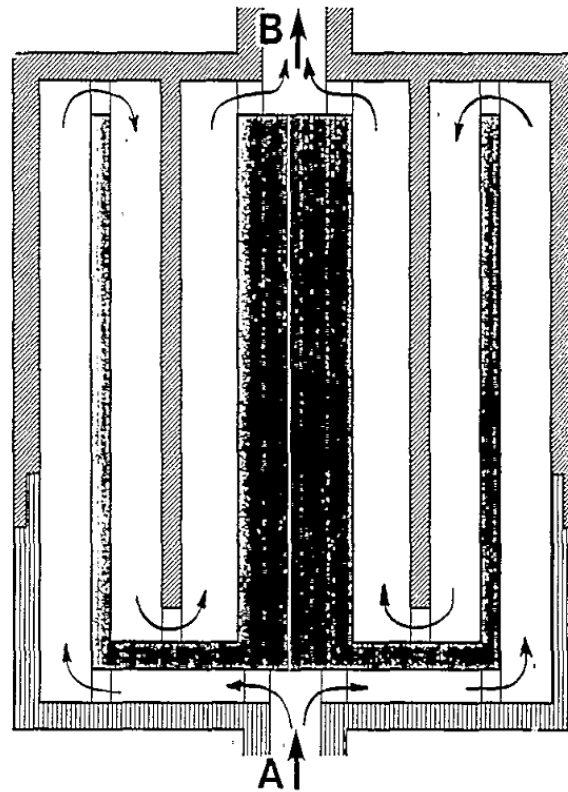


Fig. 5—The temperature dependence of partial pressure of AlCl₃ at 1 atmosphere.

Klasyczne aluminiowanie metodą CVD



F
a
s Schemat podgrzewacza

Warunki aluminiowania metodą CVD, wpływ dodatkowego podgrzewania

Table 1
Reaction conditions

| | |
|------------------------------------|------|
| Reaction temperature (°C) | 1000 |
| Pre-heating temperature (°C) | 1000 |
| Reaction pressure (Pa) | 600 |
| Reaction time (h) | 4 |
| Pre-heating time (s) | 0.3 |
| AlCl ₃ Flow rate (sccm) | 200 |
| H ₂ Flow rate (sccm) | 3000 |

Table 2
Weight gain and thickness of the aluminized layers

| Condition | Weight gain (mg cm ⁻²) | Thickness (μm) | | |
|---------------------|---------------------------------------|----------------|----------------|-----------------|
| | | Outer layer | Inner layer | Total layers |
| With pre-heating | 2.3 | 8 | 11 | 19 |
| Without pre-heating | 1.5 | 8 | 5 | 13 |

Warunki aluminiowania metodą CVD - wpływ dodatkowego podgrzewania

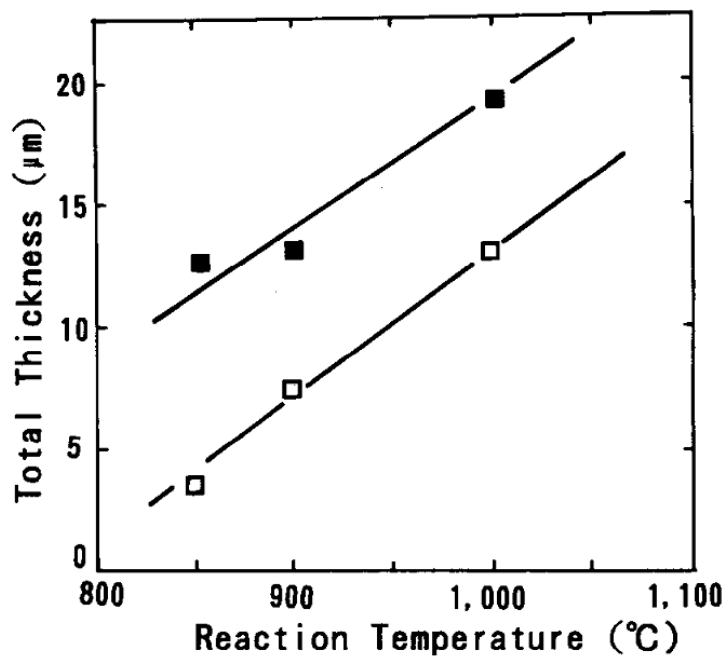


Fig. 2. Effect of reaction temperature on the total thickness of the aluminiated layers; pre-heating temperature = 950–1000°C, reaction time = 4 h. (■) With pre-heating, (□) without pre-heating.

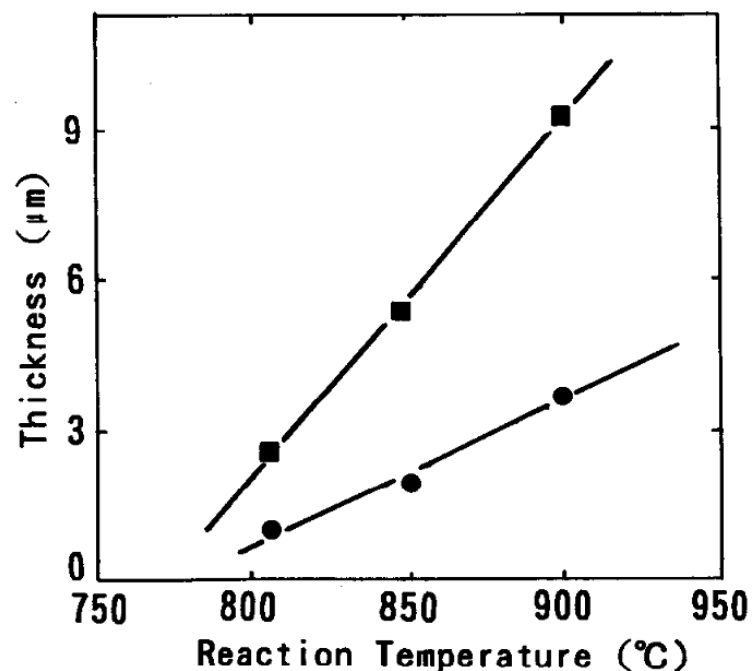


Fig. 3. Effect of reaction temperature on the layer thickness; pre-heating temperature = 950°C, reaction time = 4 h. (■) Outer NiAl layer, (●) inner diffusion layer.

Reakcje zachodzące w trakcie aluminiowania metodą CVD

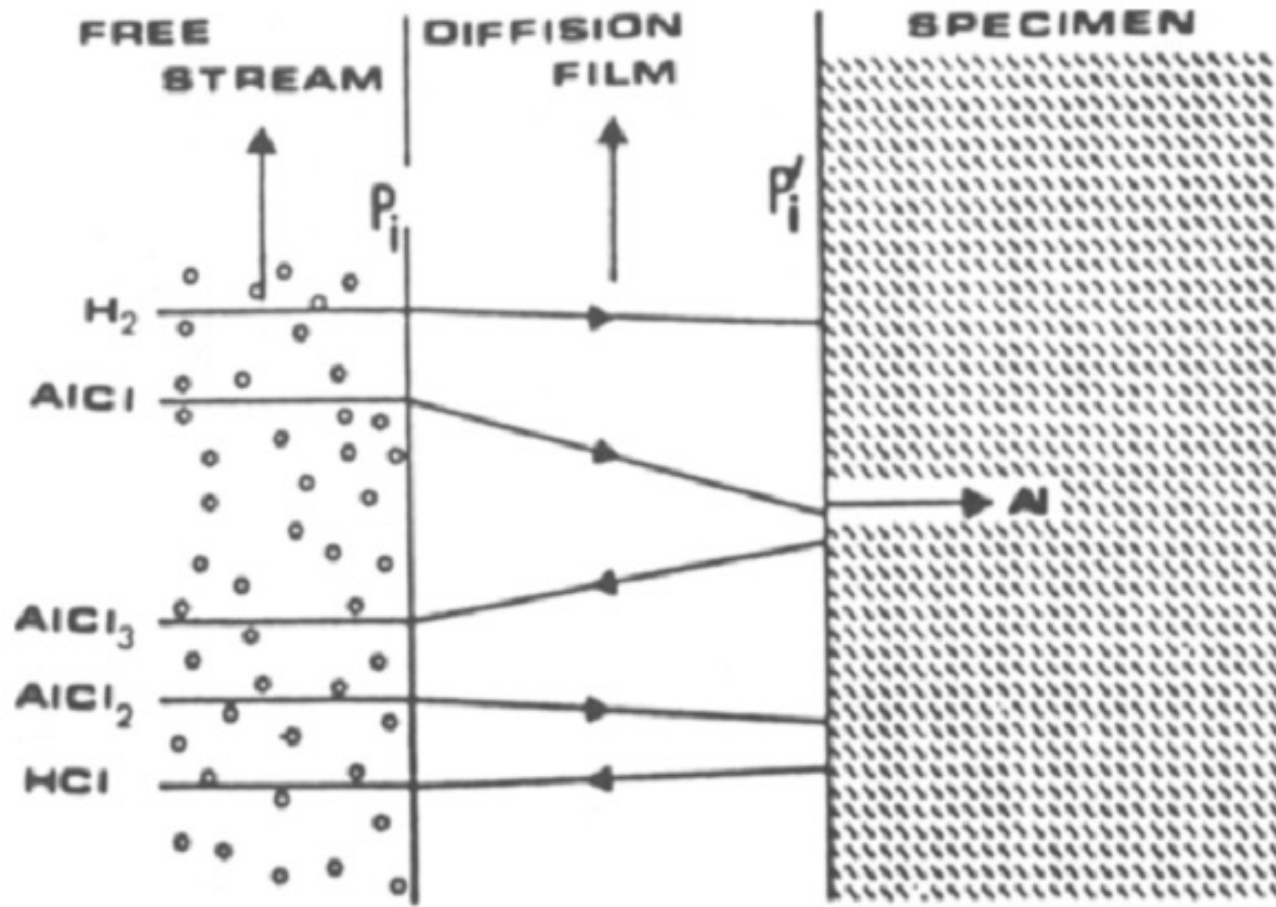


Fig. 10—Simplified diffusion film model for CVD.

Technologia CVD - Howmet

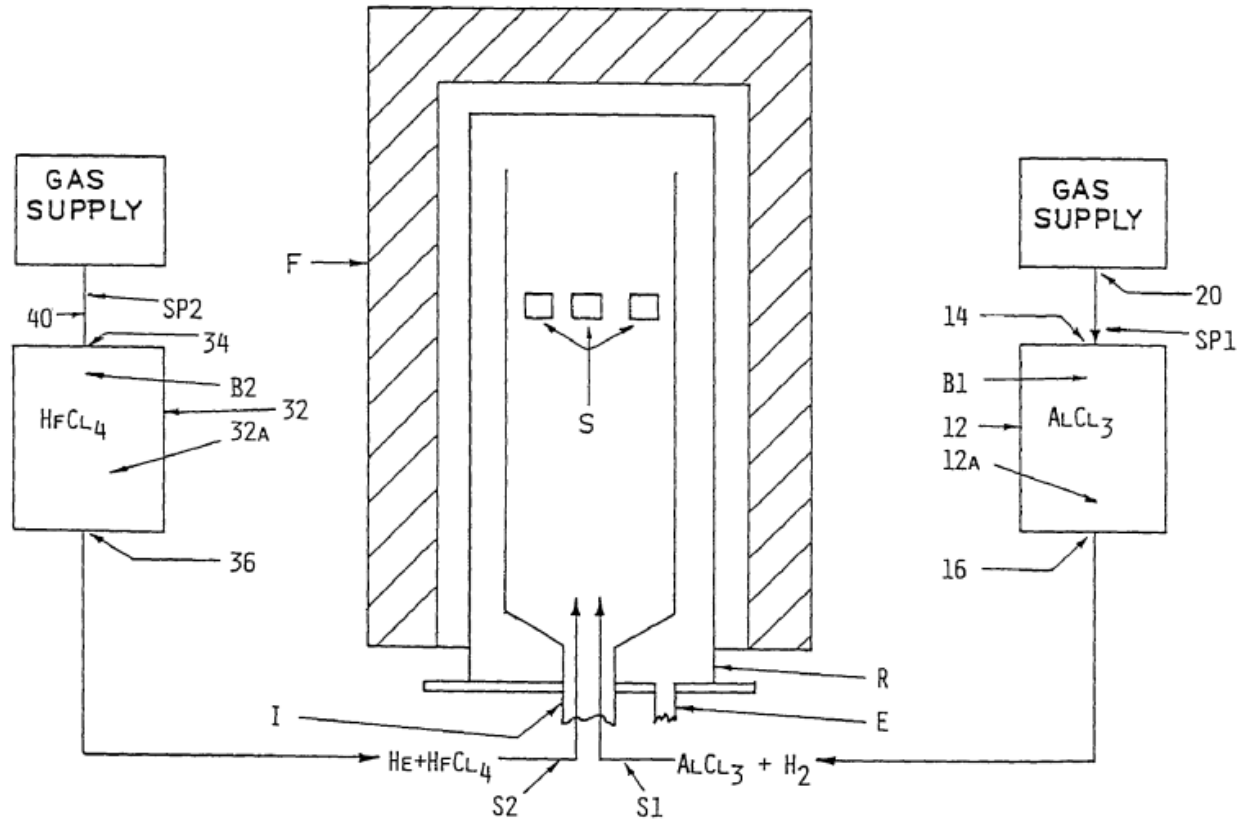


FIG. 1

Technologia CVD - Howmet

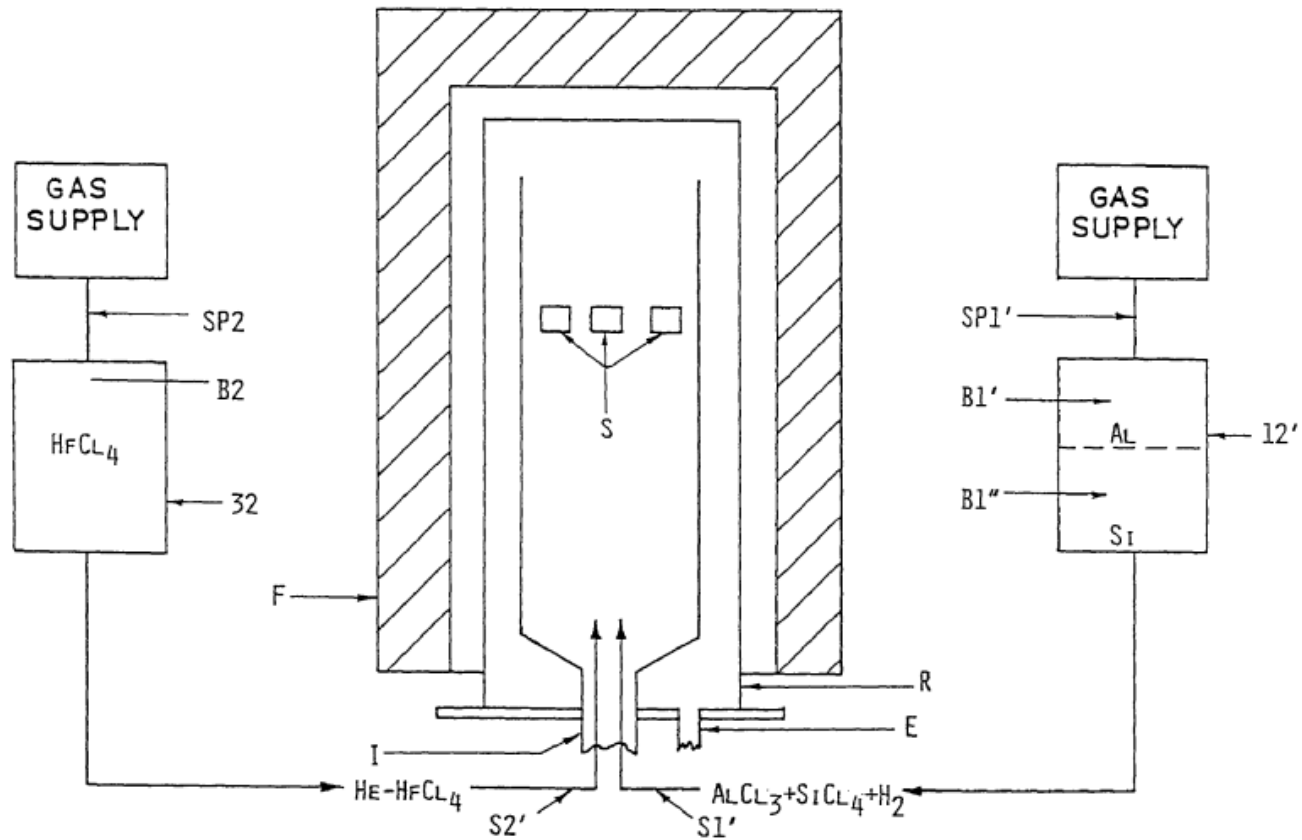


FIG. 2

Technologia CVD - Howmet

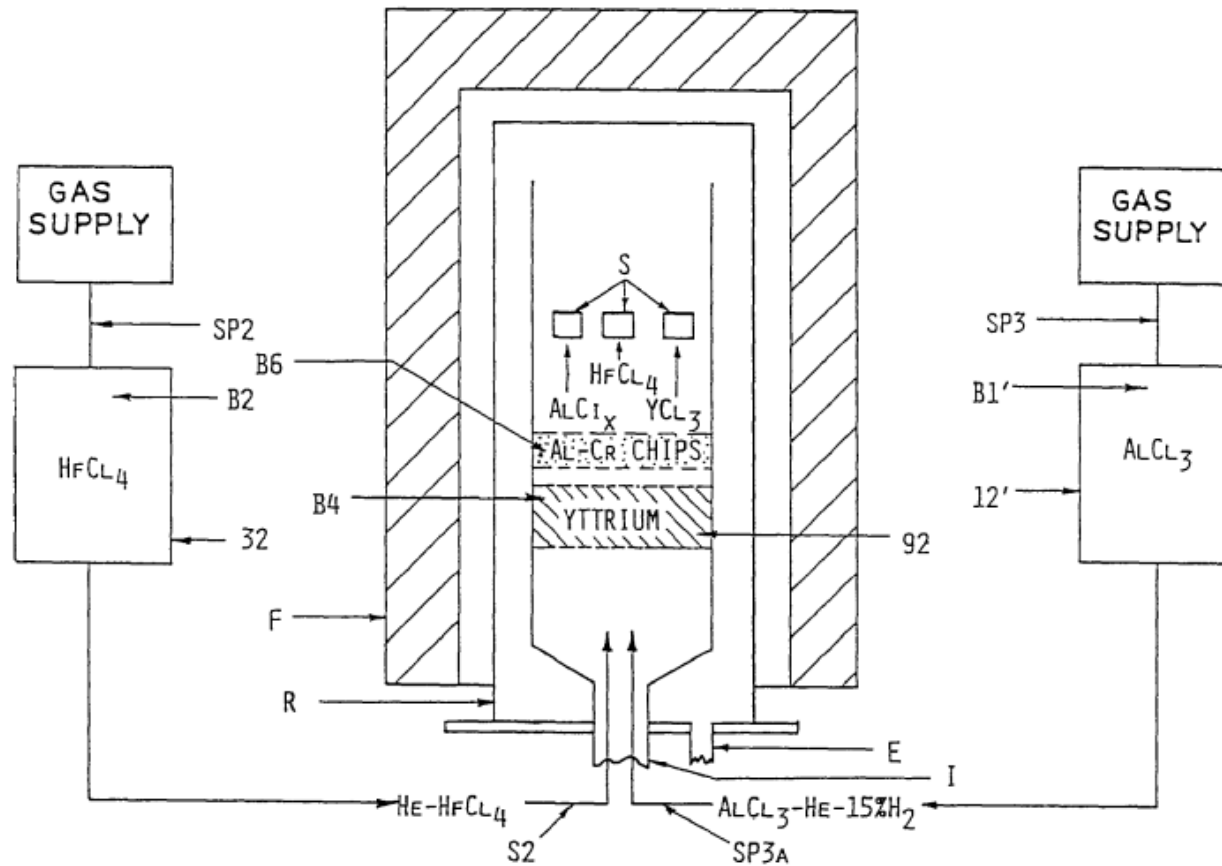


FIG. 5

Technologia CVD - Howmet

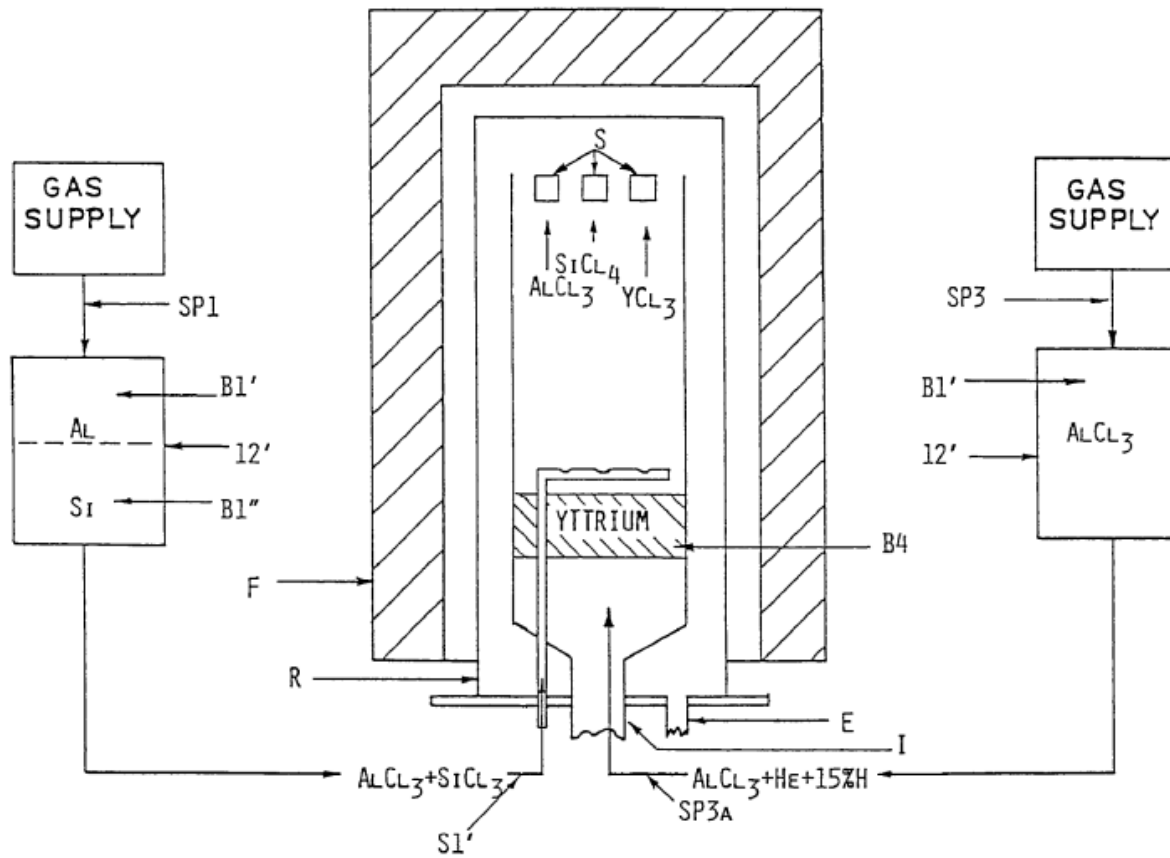


FIG. 6

Technologia CVD - Howmet

Low Activity Aluminizing Chemical Vapor Deposition

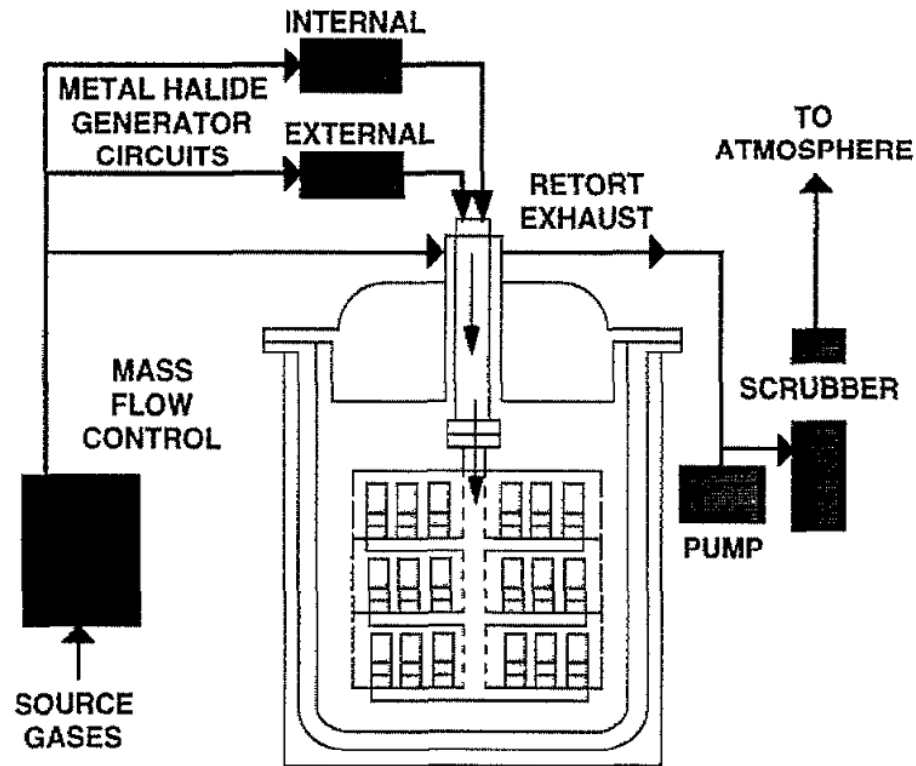
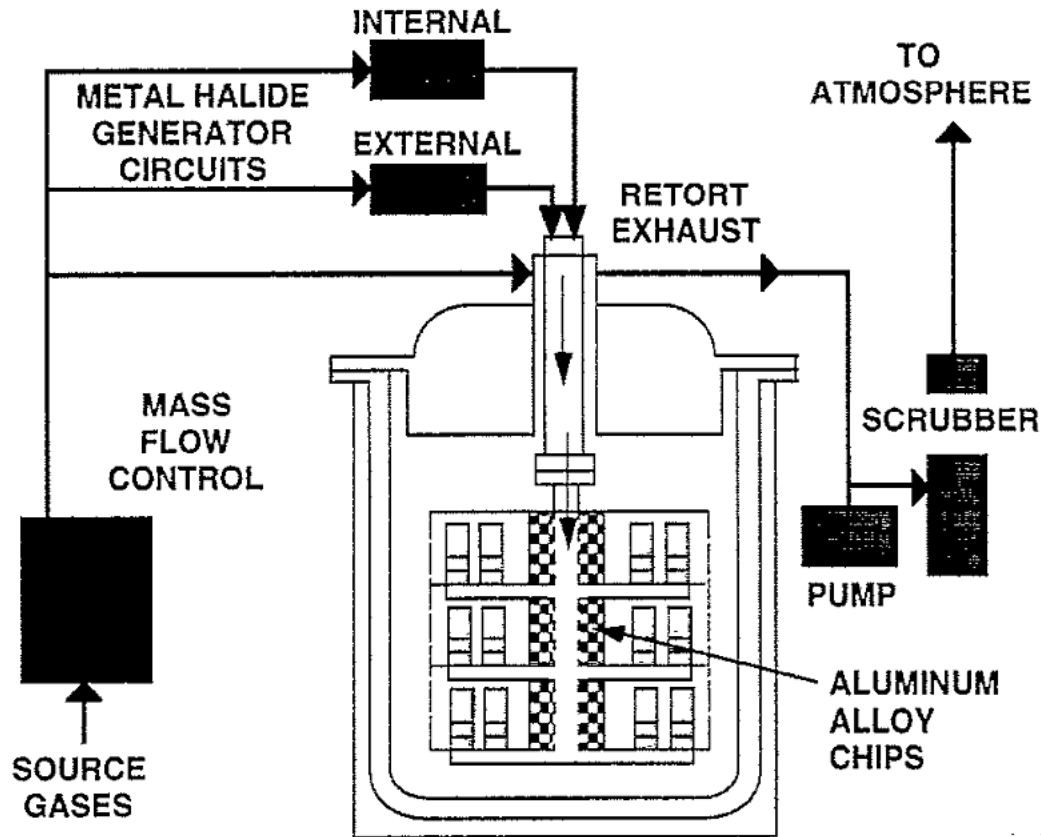


Fig. 2. Schematic diagram of the CVD low-activity aluminizing apparatus.

Technologia CVD - Howmet

High Activity Aluminizing Chemical Vapor Deposition



Technologia CVD - Howmet

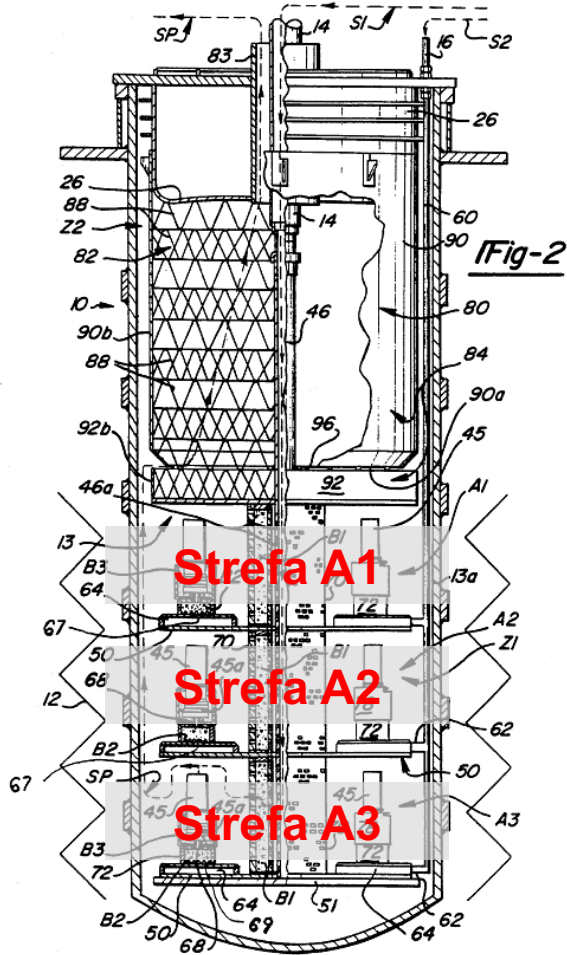
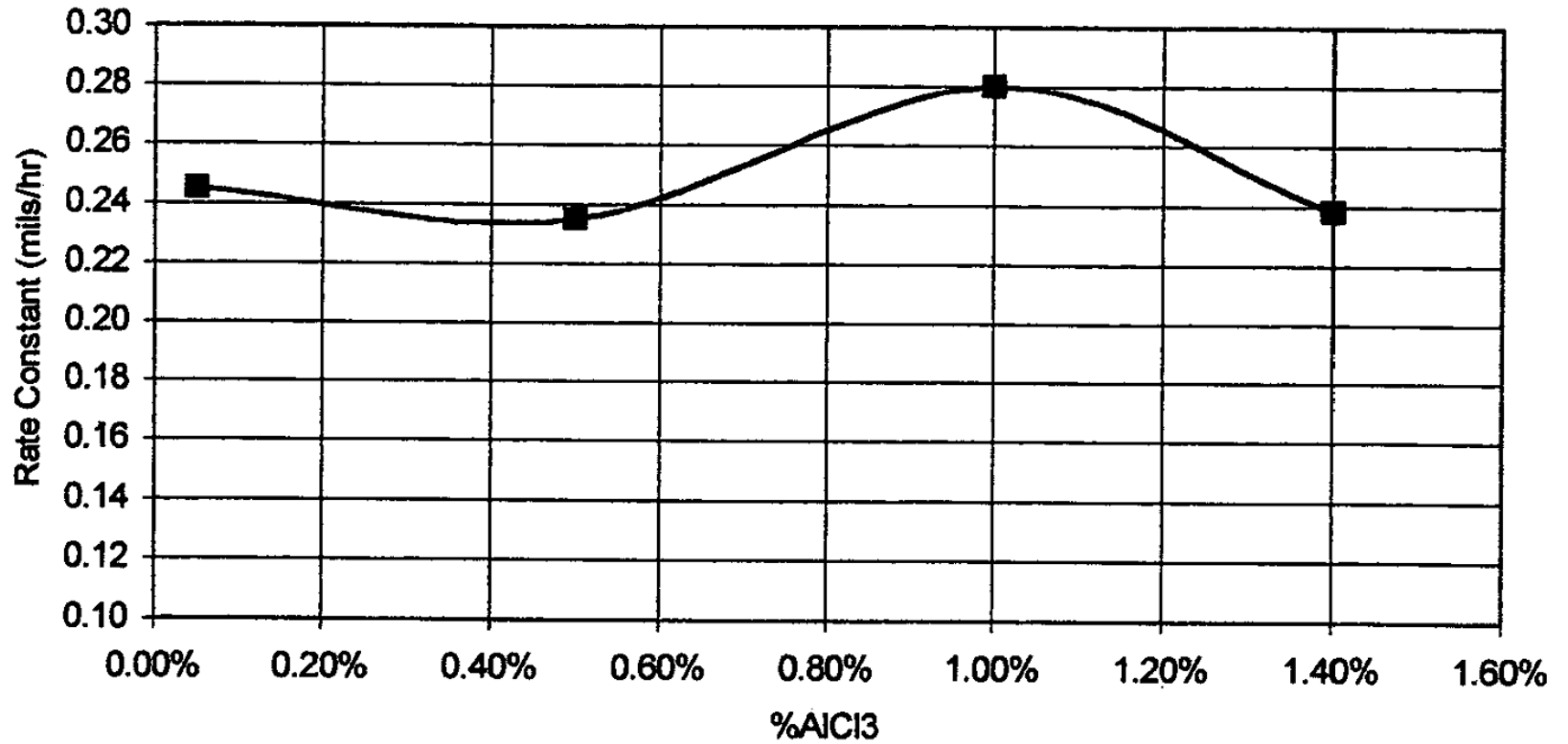


Fig-2

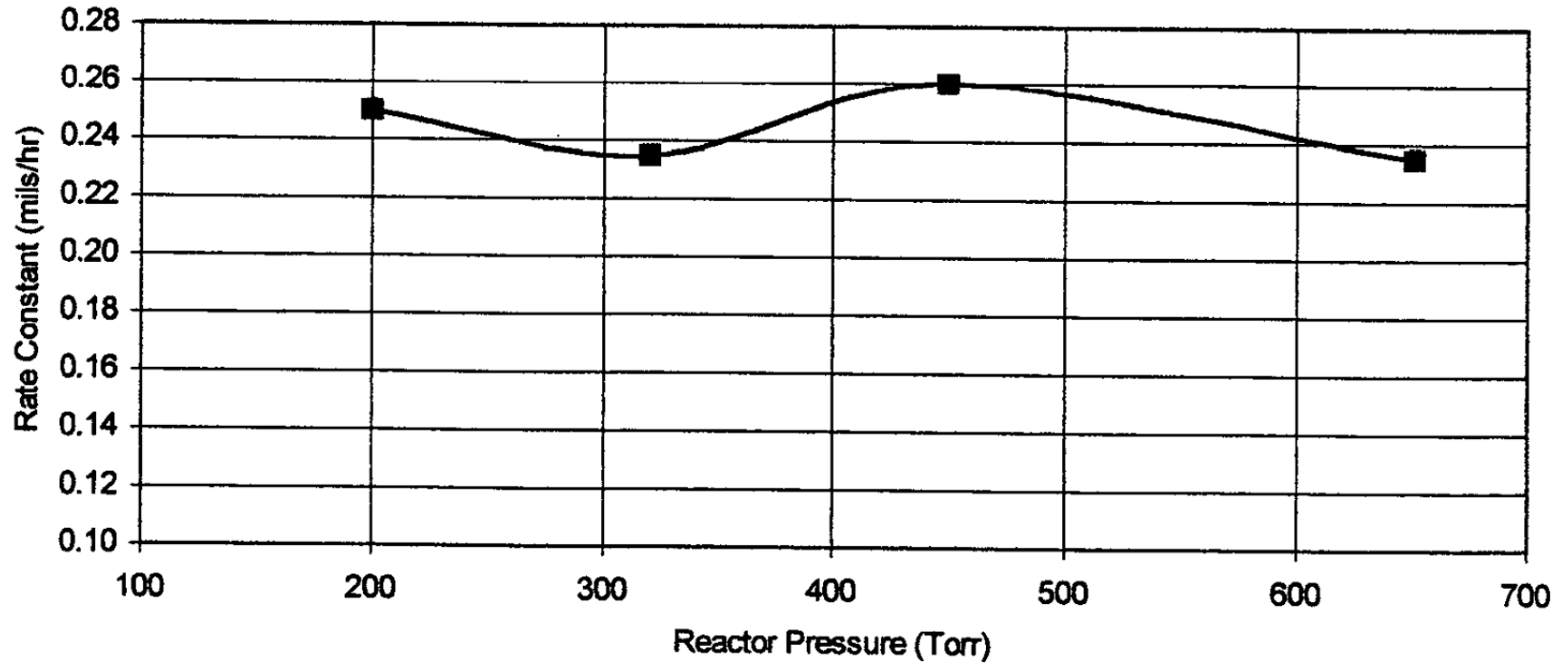
| | |
|---------|---------|
| zone A1 | 820° C. |
| zone A2 | 840° C. |
| zone A3 | 900° C. |

| | |
|---------|-------------------------|
| zone A1 | 60 wt. % Al/40 wt. % Cr |
| zone A2 | 60 wt. % Al/40 wt. % Cr |
| zone A3 | 44 wt. % Al/56 wt. % Cr |

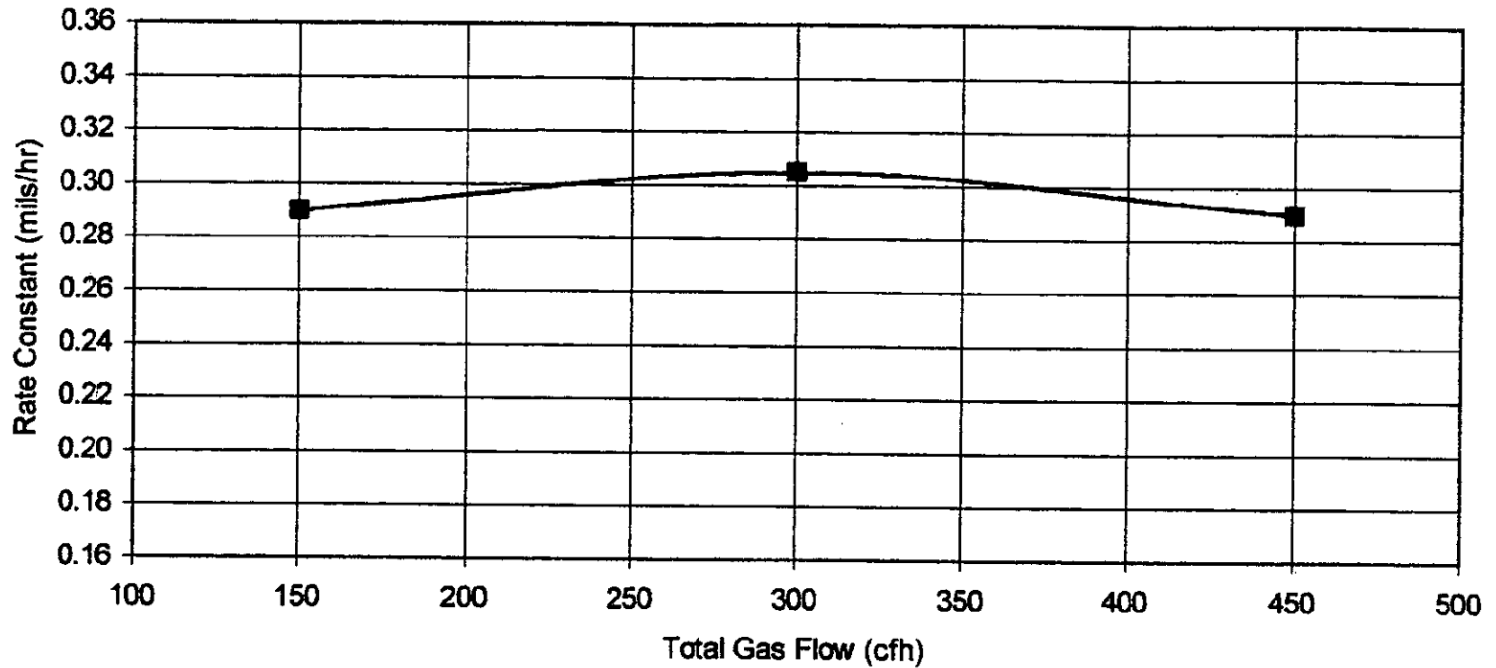
Technologia CVD - Howmet



Technologia CVD - Howmet

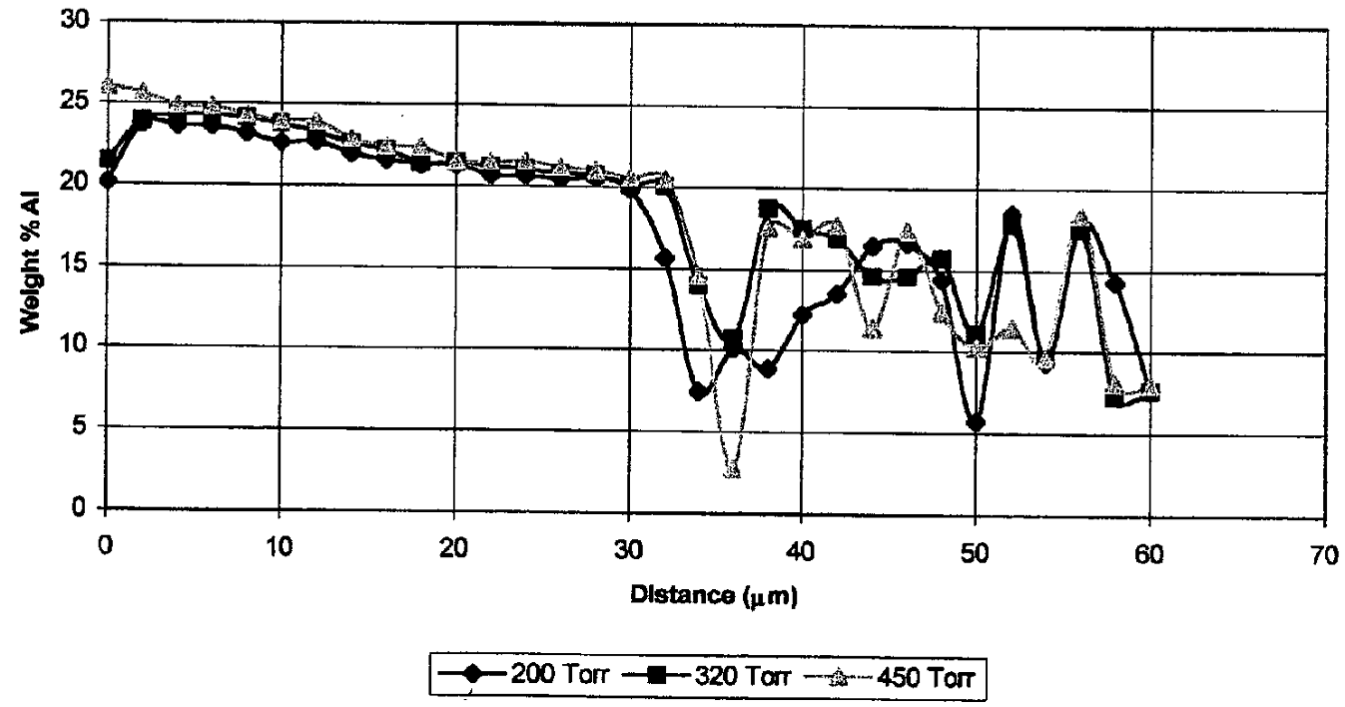


Technologia CVD - Howmet



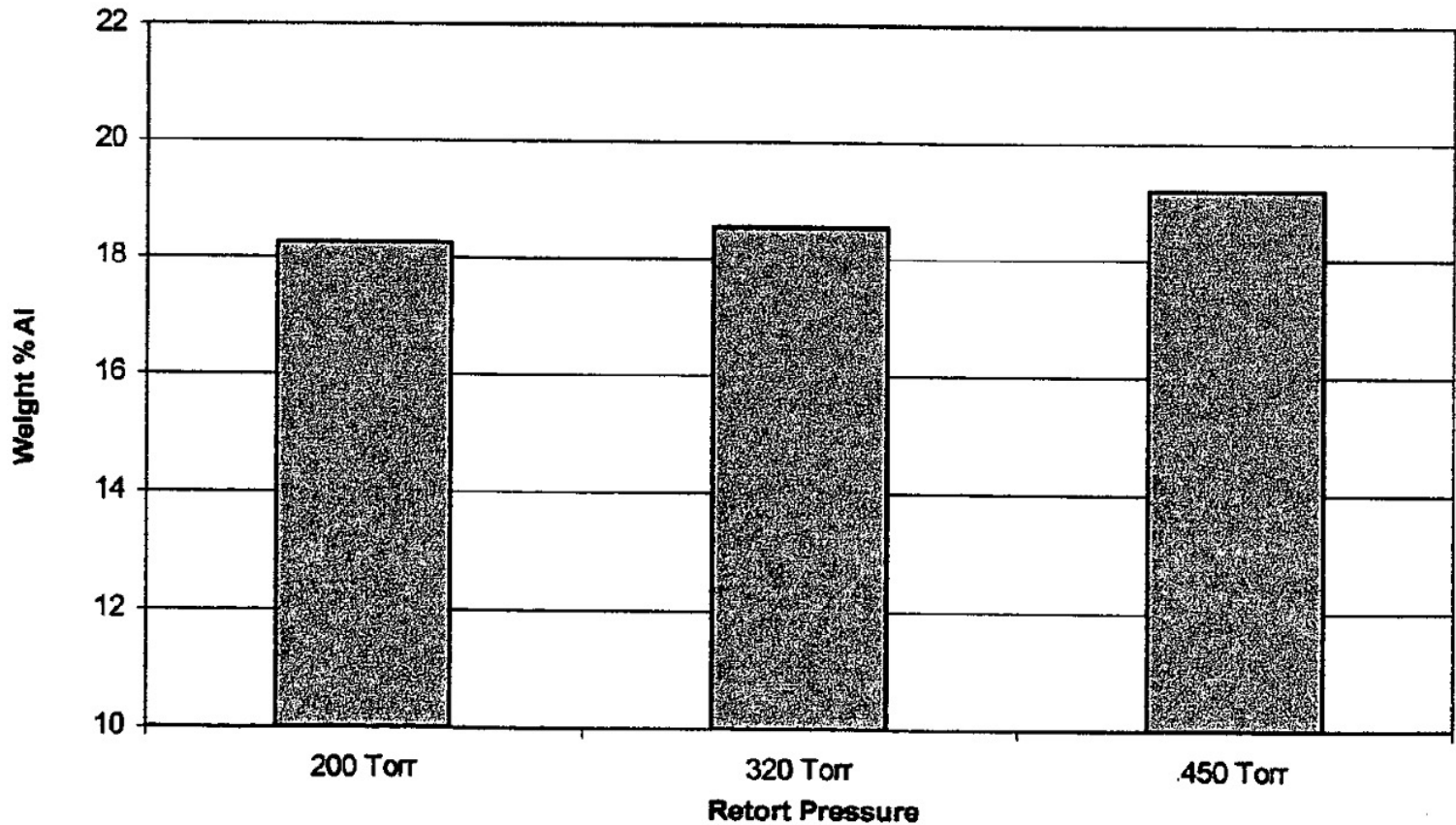
Technologia CVD - Howmet

Aluminum Concentration Profiles
Rapid Cycle Comparison - Simple Aluminide
with Various Retort Pressures
Rene' N5



Technologia CVD - Howmet

Average Aluminum Concentration
for Rapid Cycle CVD Process
with Various Retort Pressures



Technologia CVD - Howmet

Table 2

Microprobe analysis and thickness of coated IN-738 tabs

| | LDC-2E | MDC-150 | MDC-150L |
|----------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| As-coated | | | |
| Thickness | 49 μm | 52.8 μm | 78.3 μm |
| [Al] | 25.6 wt. % | 31.3 wt. % | 24.1 wt. % |
| [Pt] | 35.5 wt. % | 29.9 wt. % | 21.6 wt. % |
| As-coated and heat-treated | | | |
| Thickness | 74.3 μm | 88 μm | 77.5 μm |
| [Al] | 19.96 wt. % | 23.2 wt. % | 19.5 wt. % |
| [Pt] | 30.6 wt. % | 22.6 wt. % | 19 wt. % |

Technologia CVD - Howmet

1373K Cyclic Oxidation Pt Aluminides On IN-738

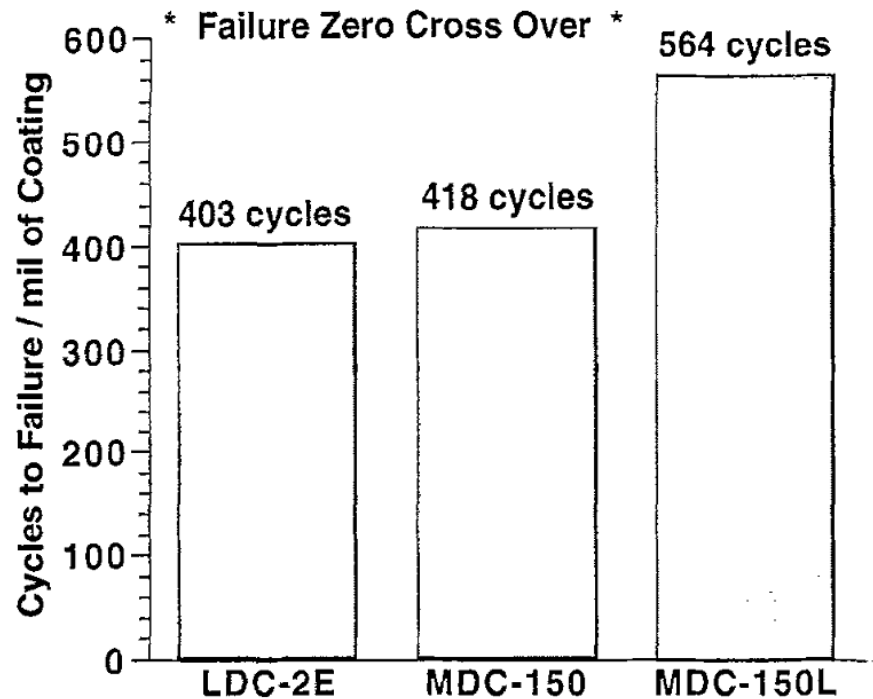


Fig. 8. Normalized cyclic oxidation life of various platinum aluminide coatings on IN-738 tabs in 1373 K testing.

TECHNOLOGIA CVD – HOWMET

– mikrostruktura warstwa

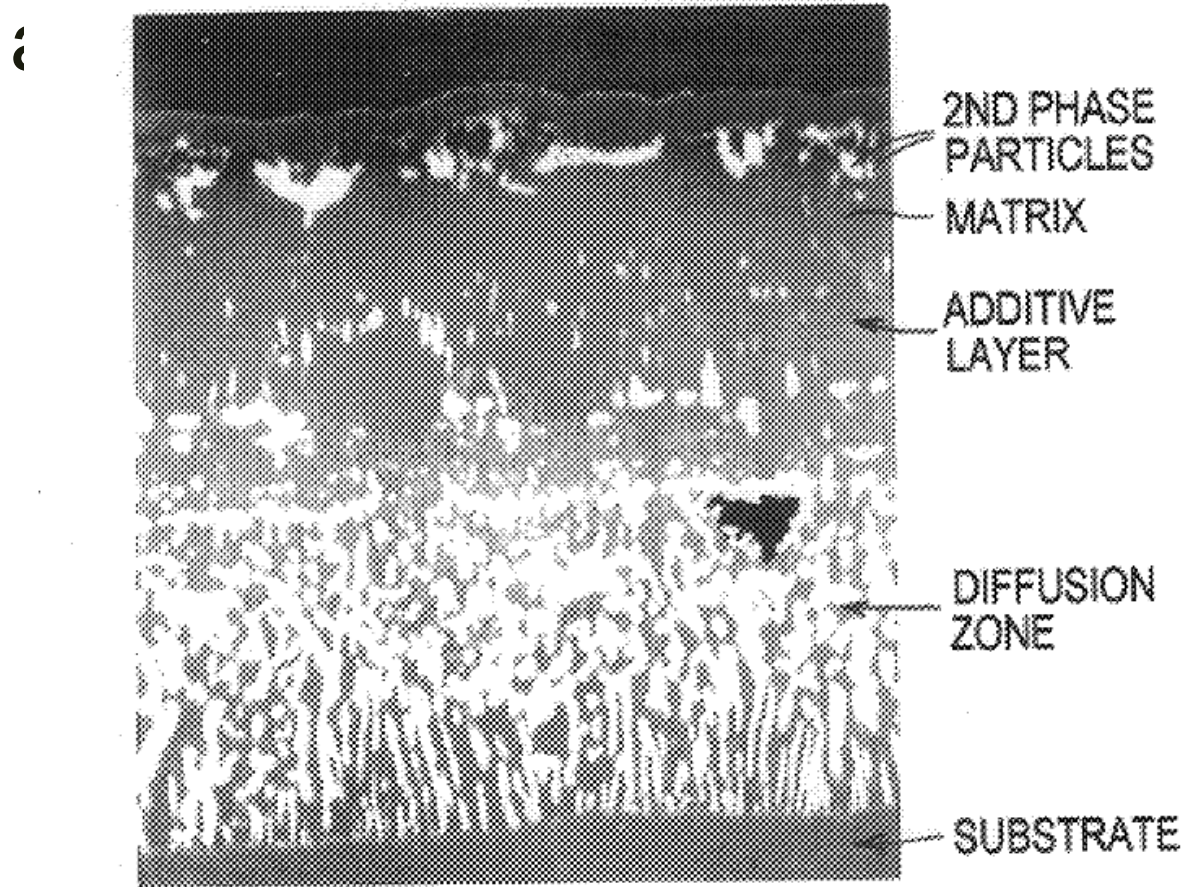


FIG. 3A

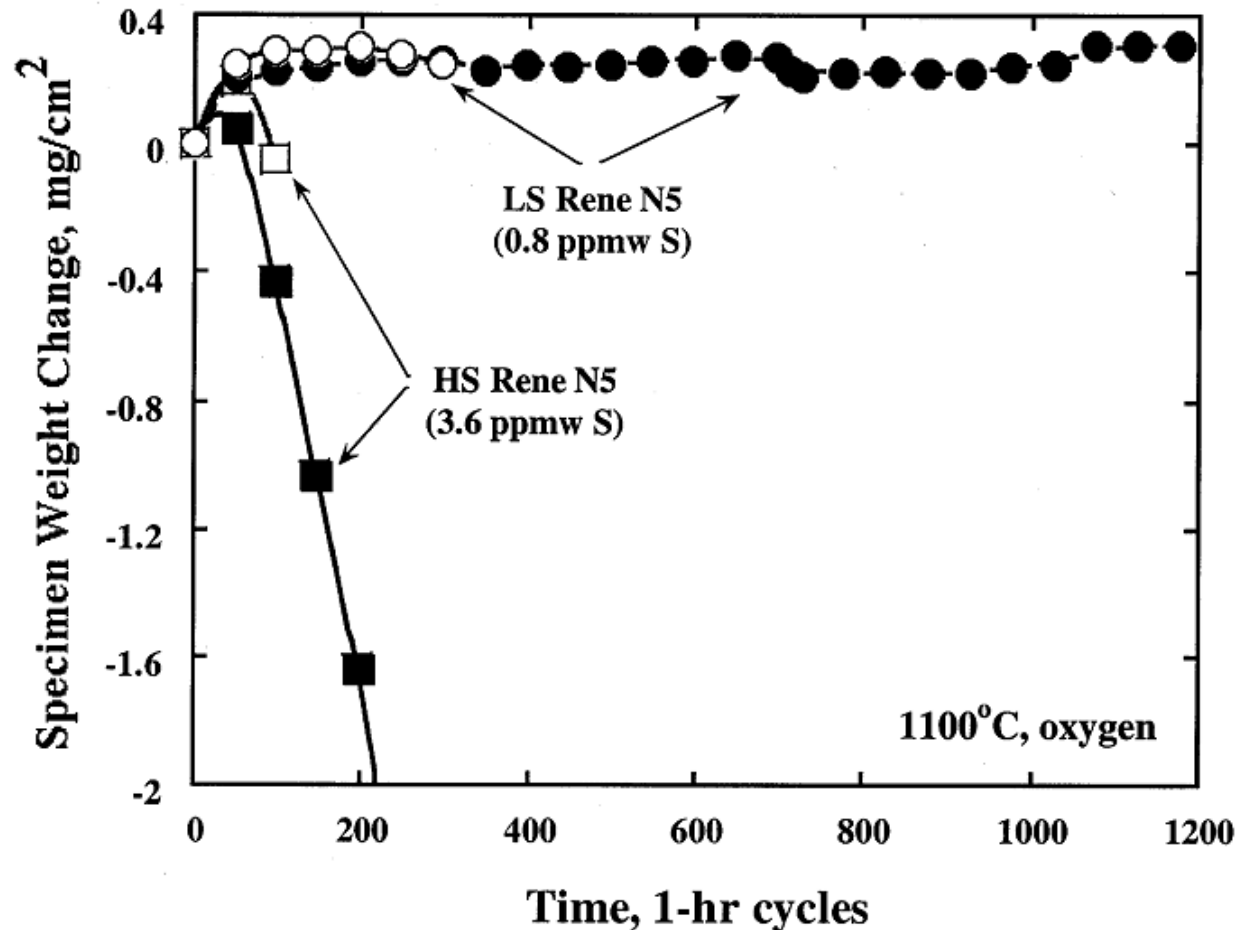
TECHNOLOGIA CVD – HOWMET – wpływ metody aluminiowania na żaroodporność

TABLE

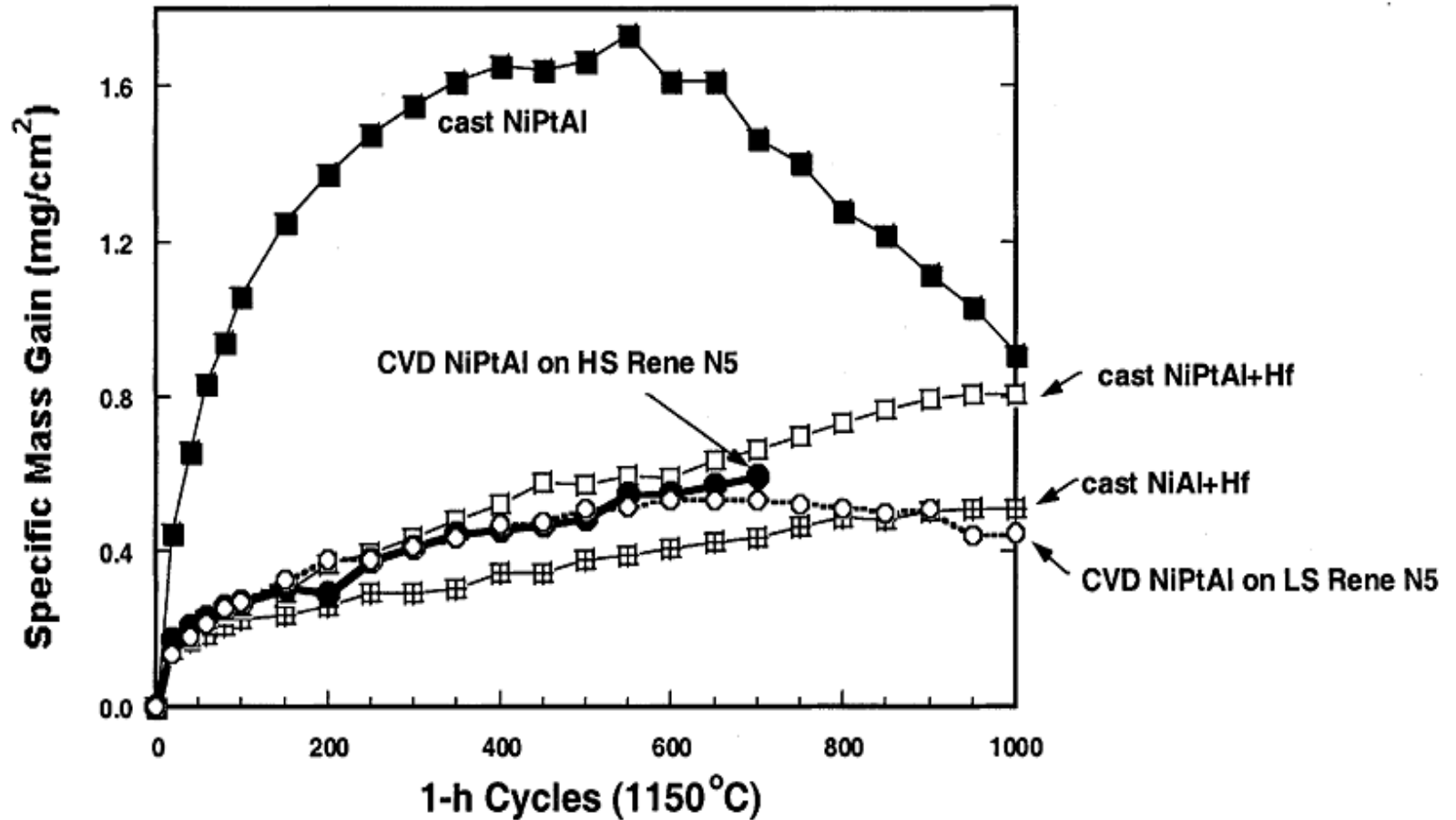
2000° F. CYCLIC OXIDATION OF COATED IN-738

| | COATING | ONE HOUR CYCLES TO FAILURE | RELATIVE LIFE |
|----|----------|-------------------------------|------------------|
| .0 | LDC-2E | 1350 | 1 |
| | MDC-150 | 1700 | 1.26 |
| | MDC-150L | 1900 | 1.41 |
| .5 | MDC-151L | 3475 | 2.57 |
| | MDC-152L | 7000 | 5.19 |

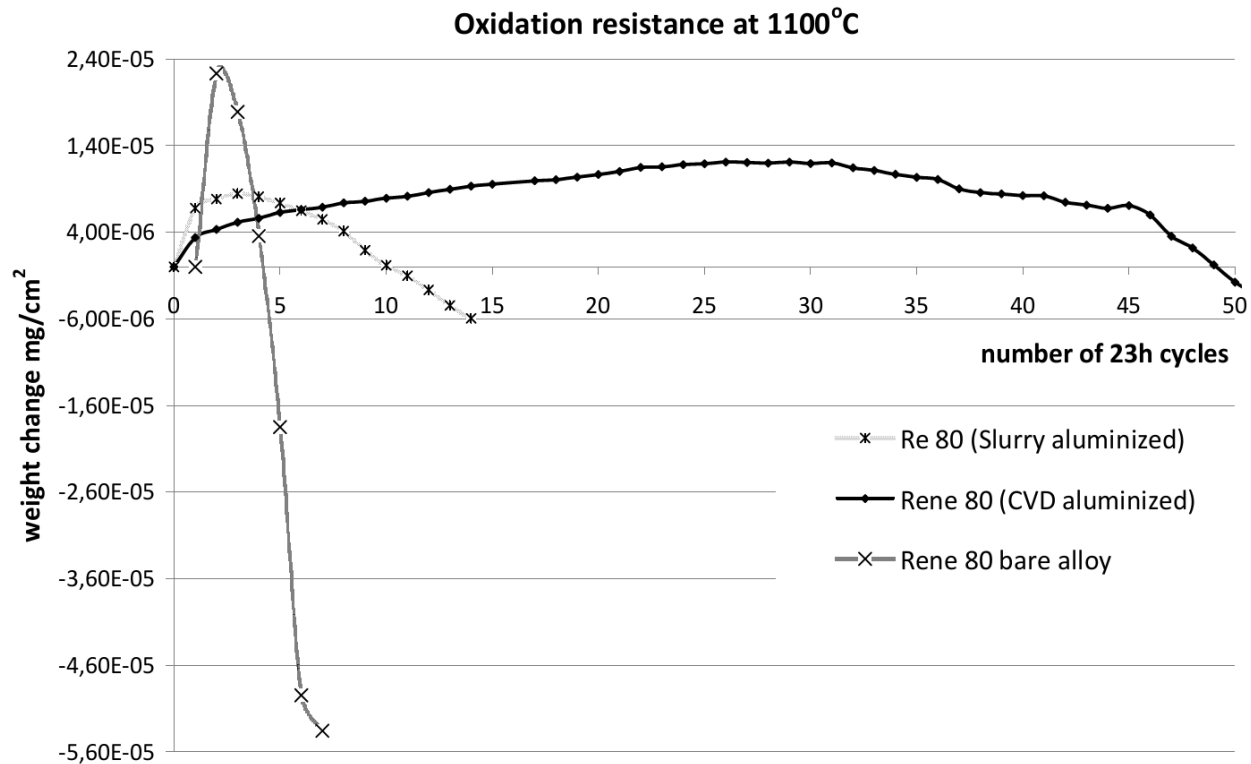
TECHNOLOGIA CVD – HOWMET – wpływ zawartości siarki w podłożu na żaroodporność



TECHNOLOGIA CVD – HOWMET – wpływ zawartości siarki w podłożu na żaroodporność

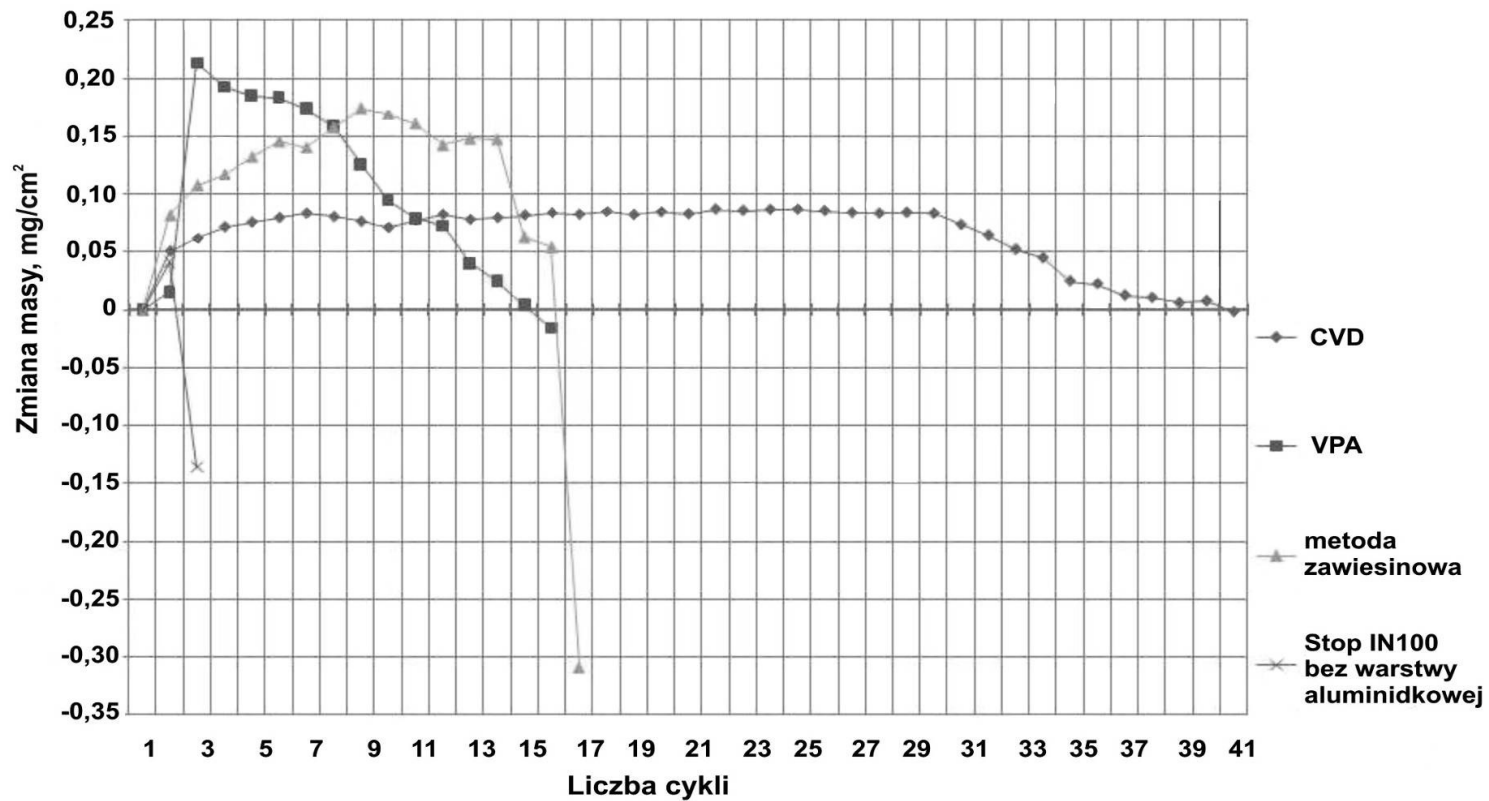


Wpływ metody aluminiowania na żaroodporność



6. The results of cyclic oxidation test at 1100°C of aluminide coatings deposited on Rene 80 nickel superalloy.

Wpływ metody aluminowania na żaroodporność



Aparatura do aluminiowania CVD – urządzenie BPX Pro 325 S

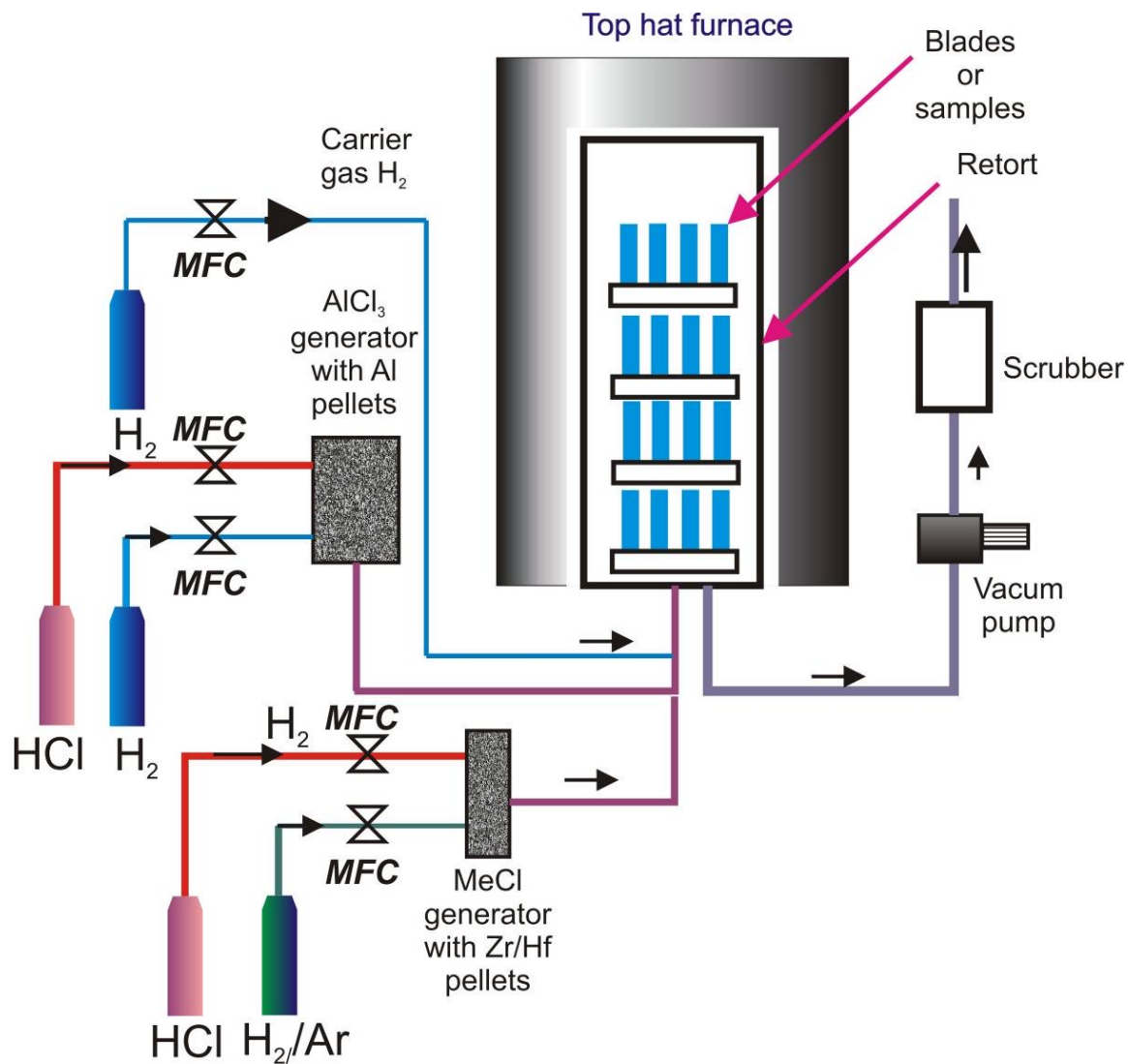


**Retorta o pojemności
180 dm³**



Piec, chłodnica i dźwig

Uproszczony schemat urządzenia do aluminiowania metodą CVD BPX Pro 325S



Oprogramowanie sterujące urządzenia CVD Bernex BPX PRO 325S

Reactor 1

611TIRCA
612TIRCA
613TIRCA
614TIRCA

420PIA
411TIRA
412TIRA
413TIRA
414TIRA

436V1 TIGHT
435TS1

MeCl₃ - Generator 1
H₂ T1
HCl
Ar P

AlCl₃ - Generator
H₂ T1
HCl T2
P T3

436V1 TIGHT
080PI
719PIRCA
440MT
401V1
100B1 MC
732HV1
450B1 CT
460V1
720GI
720MV1
731HV1
741HV1
470V1
480V1

715PS1 P = OK
711V1
710M1
714PIA
LRVP
ORVP
740M1
FAN
620M1
FLAP CLOSED

Cooling / Fill
H₂ N₂
210HV1 220HV1 230V1 240V1
250FIRCA
222V1
403V1
223HV1

108PIA 108V1 402V1
VENT
BYP
DIR
101V1
102PIA

Main Gas Manifold
H₂ CH₄ 0.00 H₂S 0.00 HCl 0.00
N₂ 0.00 CO 0.00
CO₂ 0.00

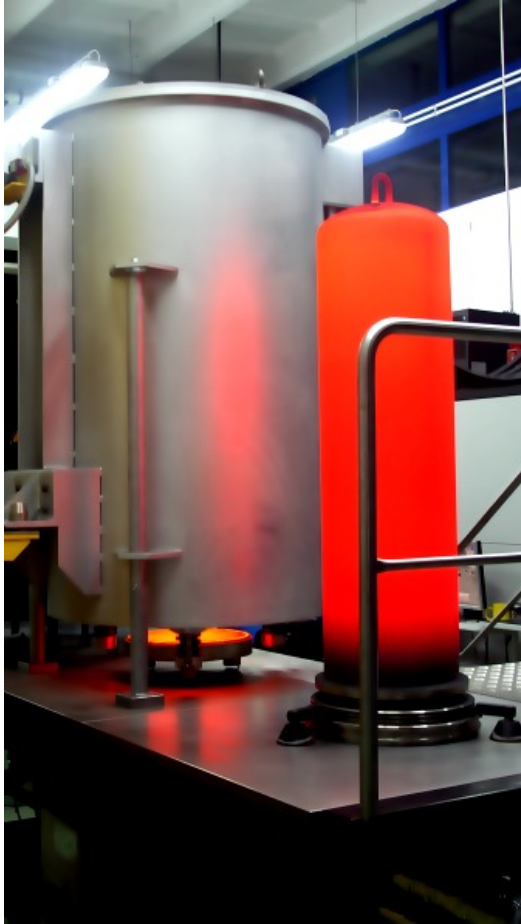
Liquid MFC's
TiCl₄ 0.00
CH₃CN 0.00

Information
Instruction: Move Furnace over Reactor 1
Last Alarm

| Ack | Time In | Time Last | Tagname | Status | Value | Description | Total |
|-----|---------|-----------|---------|--------|-------|-------------|-------|
| | | | | | | | 2 |

F1 Reactor 1 F2 Reactor 2 F3 START F4 WAIT F5 CONTINUE F6 RECOND F7 SEAL PURGE F8 END F9 Heat. Tapes F11 Alarms F12 Mainmenu C-F12 Utilities

Warunki procesu aluminiowania

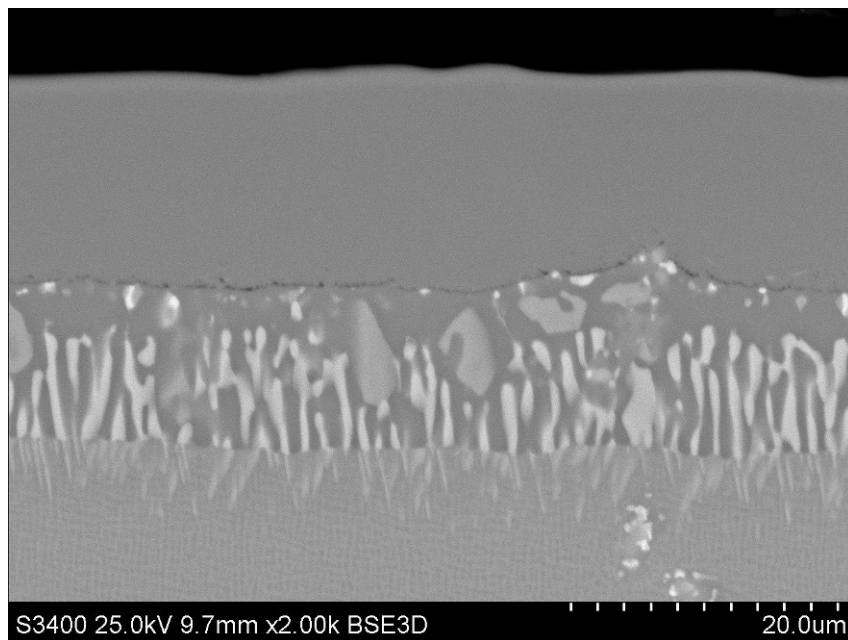
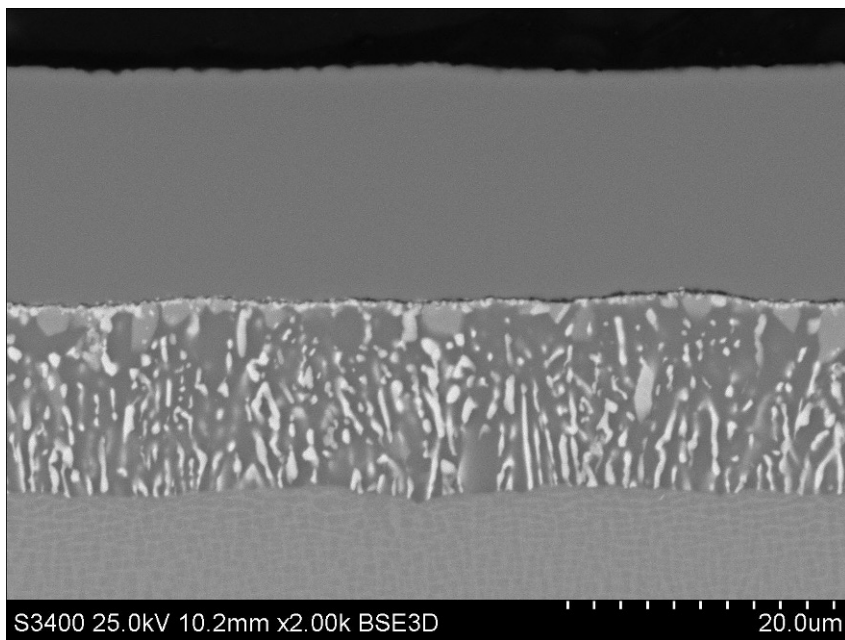


- ❖ Temperatura (950-1040°C)
- ❖ Czas (2-12h)
- ❖ Ciśnienie (5-350 mbar)
- ❖ HCl - przepływ (0.2-2 NLPM)
- ❖ Wodór- przepływ (10-30 NLPM)

Przykłady warstw aluminiowych wytworzonych w procesach niskoaktywnych

MAR M200 (DS)

René 80



Warunki procesu: 12h/1040°C, 0.4 HCl, 150 mbar podłoże: DS MAR M200 i René 80

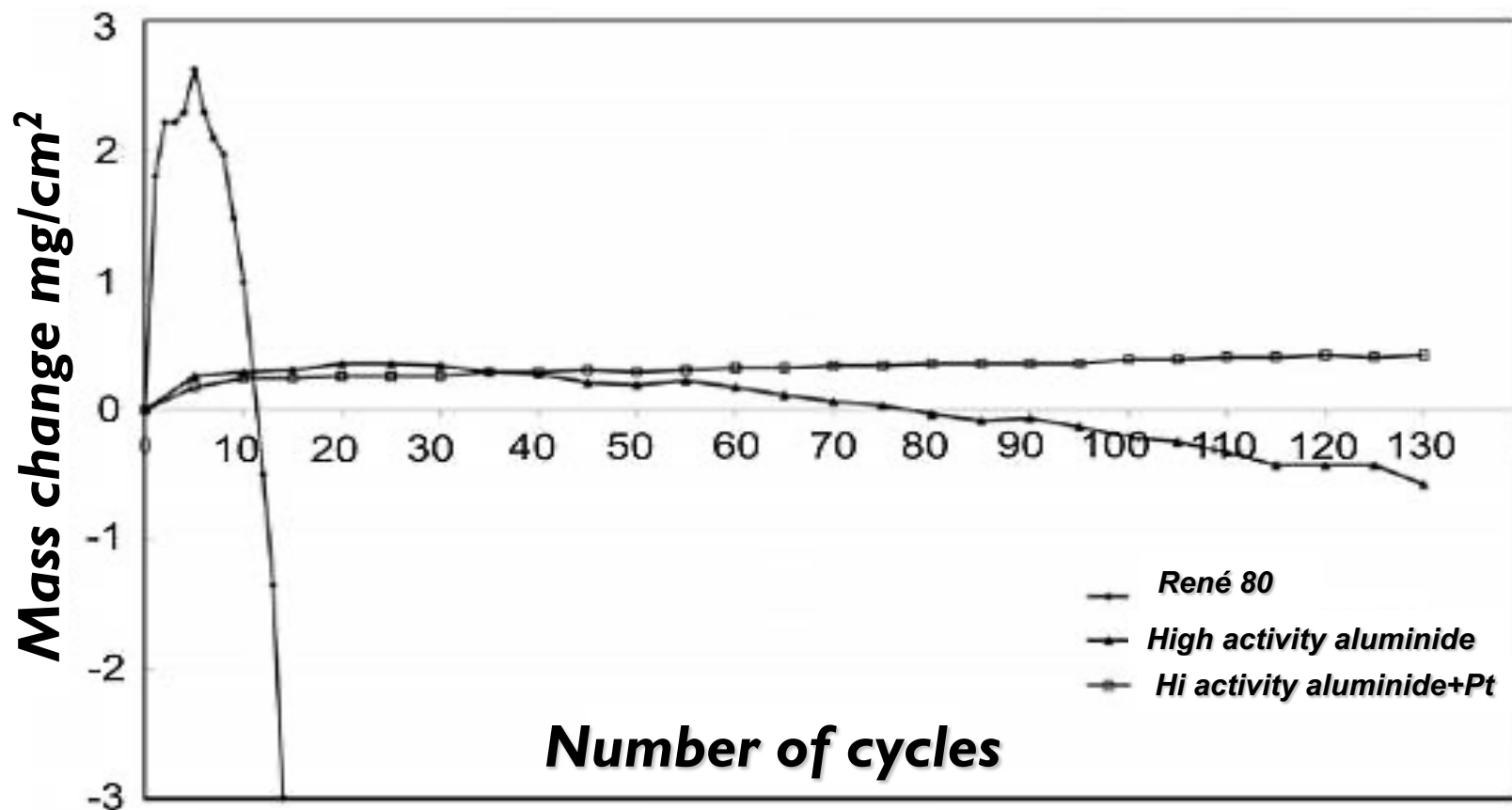
Modyfikowane warstwy aluminiidkowe

- ❖ Warstwy modyfikowane platyną – standard przemysłowy (Pt osadzana galwanicznie+aluminiowanie met. VPA lub CVD)
- ❖ Warstwy modyfikowane palladem – substytut drogiej platyny
- ❖ Warstwy modyfikowane hafnem i cyrkonem – wprowadzane w trakcie aluminiowania metodą kontaktowo-gazową lub CVD

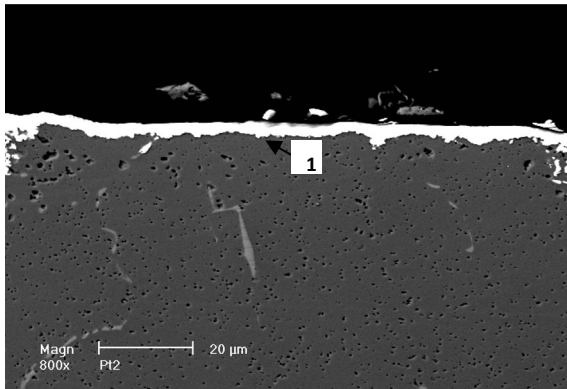
Wpływ modyfikacji platyną

- ❖ ograniczenie dyfuzji atomów niklu, chromu, kobaltu i tytanu do obszaru przypowierzchniowego
- ❖ Ogranicza tworzenie i wzrost niestabilnych i kruchych spineli (Ni,Cr,Co,Ti) Al_2O_4 - w strefie TGO (thermally growth oxide)
- ❖ Utrzymuje wysoką zawartość aluminium w obszarze strefy β -NiAl / α - Al_2O_3 (międzywarstwa/ warstwa tlenków)
- ❖ Zwiększa odporność na korozję siarkową

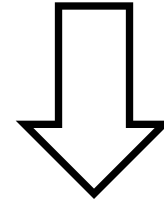
Wpływ platyny na odporność na utlenianie warstwy aluminidkowej



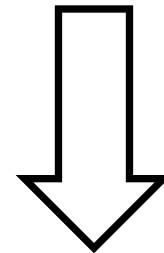
The results of 1-h cyclic oxidation test at 1100°C of aluminide coating deposited by pack cementation method on René 80 (GE Co.) [K. Shirvani et al.]



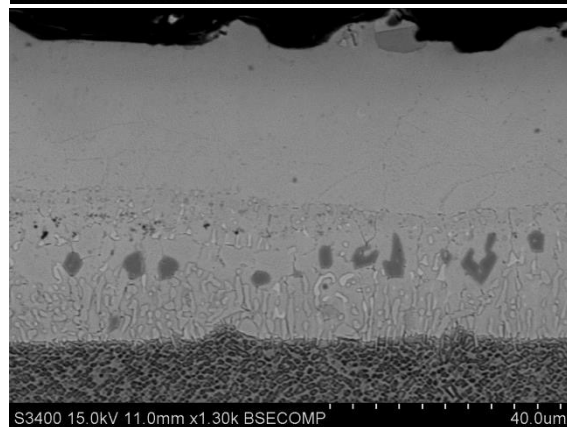
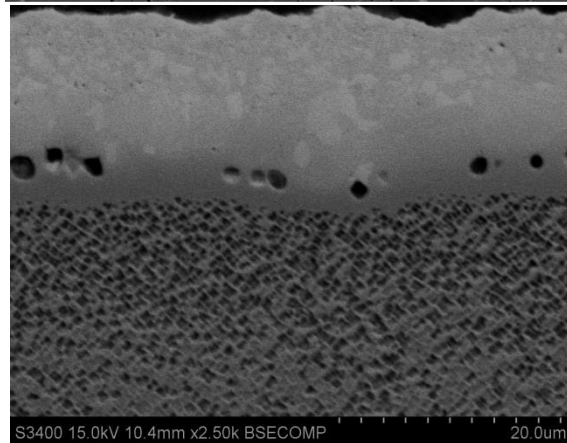
Warstwa galwaniczna Pt



Wyrzewanie warstwy Pt w 1050°C- faza NiPt



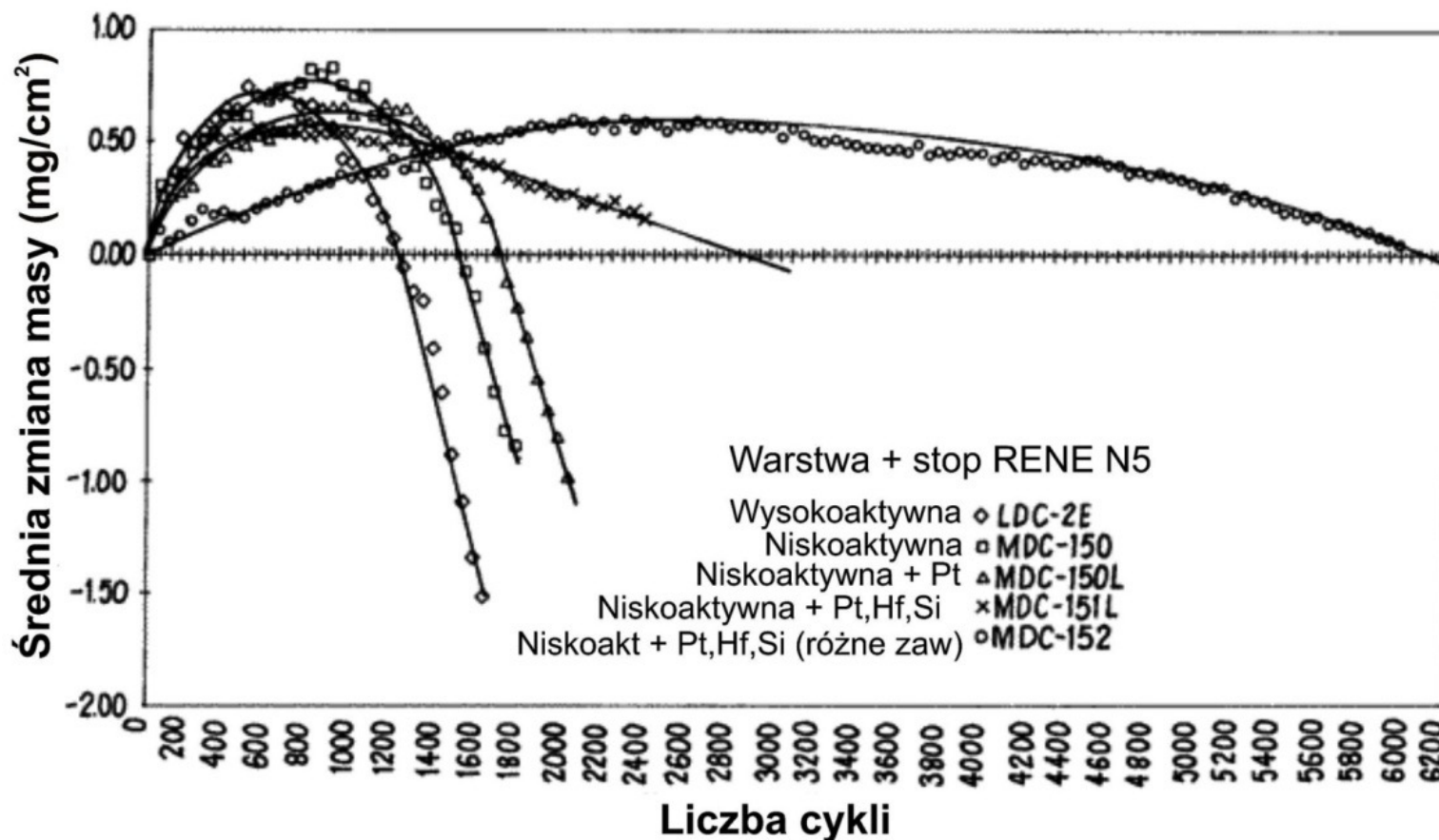
Warstwa aluminidkowa jednofazowa (Ni,Pt) Al



Wpływ modyfikacji Zr, Hf i Y dyfuzyjnych warstw aluminidkowych

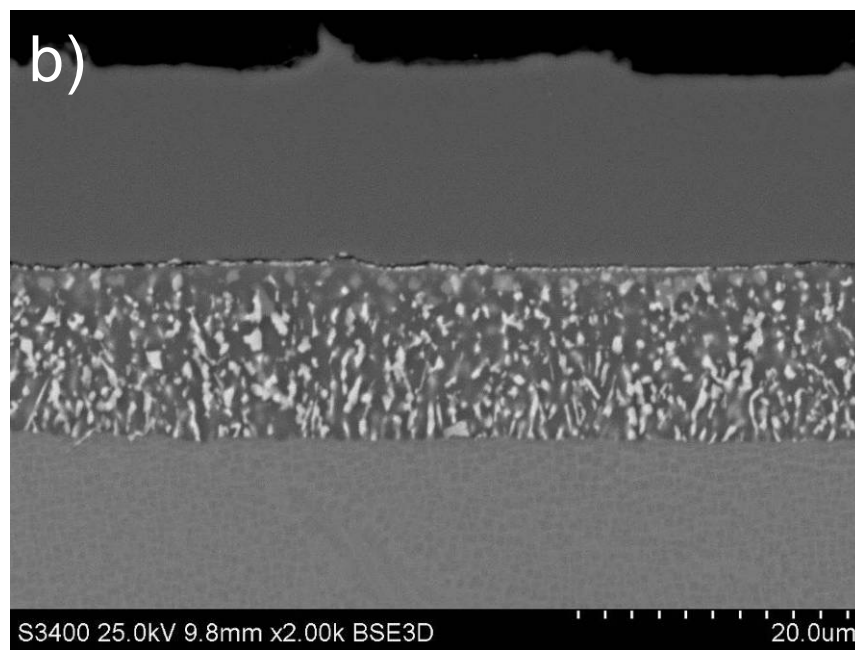
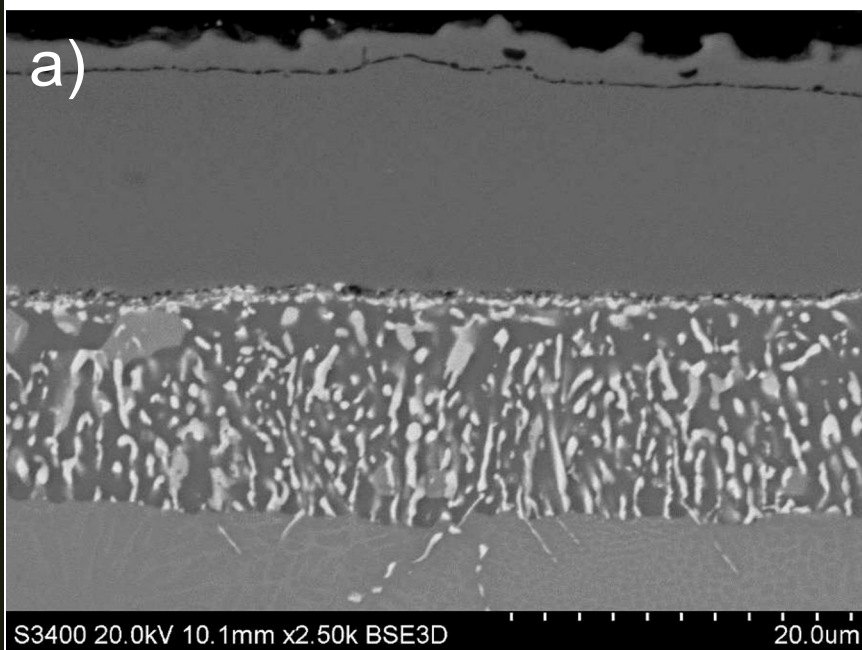
- ❖ 3-krotne zwiększenie adhezji tlenku $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ do fazy $\beta\text{-NiAl}$
- ❖ Ograniczenie przemiany martenzytycznej w warstwie aluminidkowej
- ❖ Blokuje poślizg po granicach fazy $\beta\text{-NiAl}$ i tlenków $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$
- ❖ Ograniczenie naprężeń w warstwie (zapobiega łuszczeniu się i delaminacji warstwy tlenków)
- ❖ Ogranicza dyfuzję aluminium po granicach ziarn polikrystalicznego $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$
- ❖ ogranicza dordzeniową dyfuzję tlenu do podłoża

Wpływ modyfikacji Pt, Hf, Si warstw aluminiowych na odporność na utlenianie (Howmet)

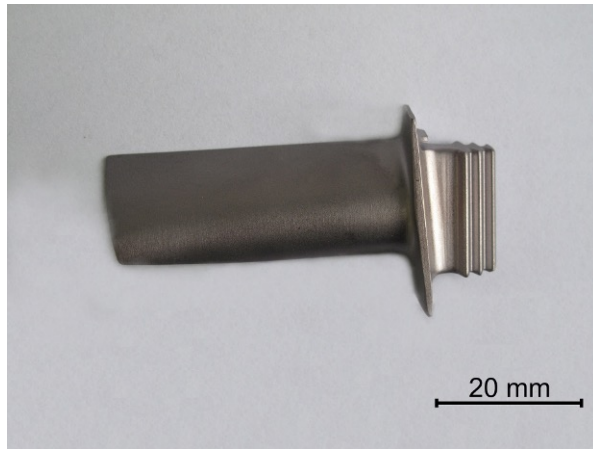


Krzywe zmiany masy w funkcji mg/cm^2 dla różnych typów warstw utworzonych na nadstopie RENE' N5 – CGDS – po próbach cyklicznego utleniania w czasie 1h i w temperaturze 1100°C

***Mikrostruktura warstw aluminiowych modyfikowanych Zr
na próbkach ze stopu MAR M200+Hf
w procesie podwójnym (a) i pojedynczym (b)***



Warstwy aluminidkowe modyfikowane cyrkonem na łopatkach turbin



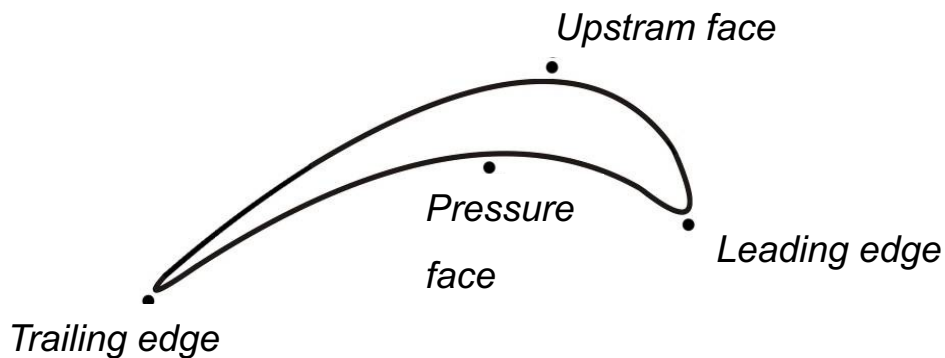
Skład chemiczny materiału podłoża

| <i>Content of element, wt. %</i> | | | | | | |
|----------------------------------|------|-----|-----|-----|-----|------|
| Alloy | Ni | Cr | Co | W | Al | Mo |
| ZS6K | Bal. | 9,8 | 5.0 | 5.0 | 4.5 | 10.5 |

Wykaz procesów aluminowania łopatek

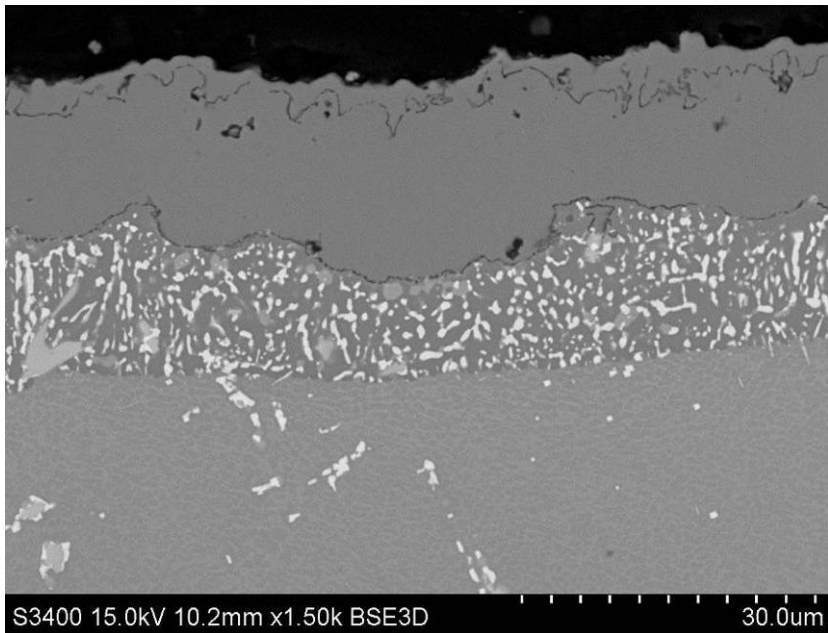
- Łopatka nr 1; aluminowanie + cyrkono-aluminowanie 3.5h/1020°C
- Łopatka nr 2; aluminowanie 5h + cyrkono-aluminowanie 5h/1020°C
- Łopatka nr 3; cyrkono-aluminowanie 5h/1020°C + cyrkono-aluminowanie 3.5h/1020°C

Grubość warstwy Zr-Al na przekroju profilu łopatek turbin

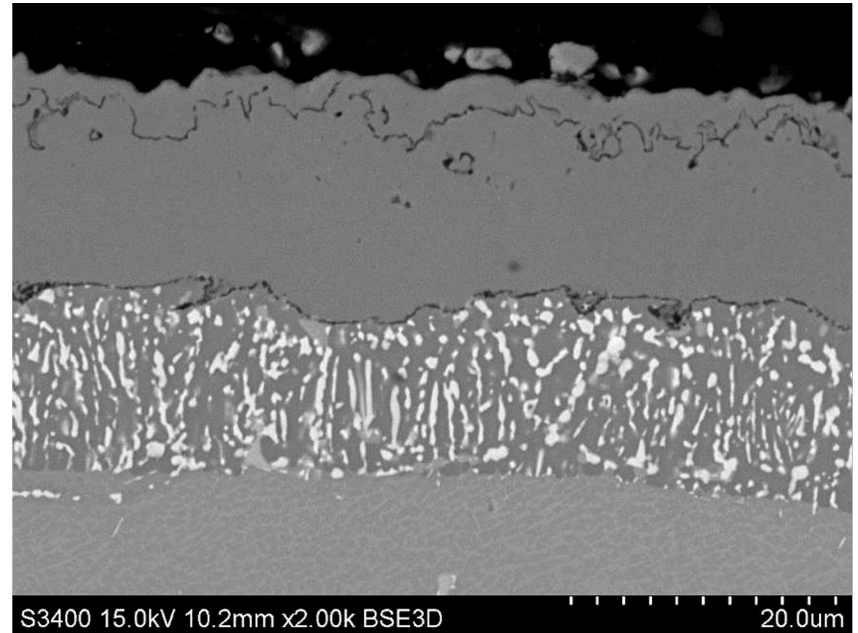


| Test point | Blade no. | | |
|-----------------------------|-----------|------|------|
| Thickness [μm] | 1 | 2 | 3 |
| Leading edge | 19 | 25.4 | 30.2 |
| Pressure face | 18,2 | 22.8 | 30.4 |
| Upstream face | 18.8 | 25.2 | 30.6 |
| Trailing edge | 18.4 | 23.8 | 31.4 |

Mikrostruktura dyfuzyjnej warstwy aluminidkowej modyfikowanej Zr na łopatkcie turbiny

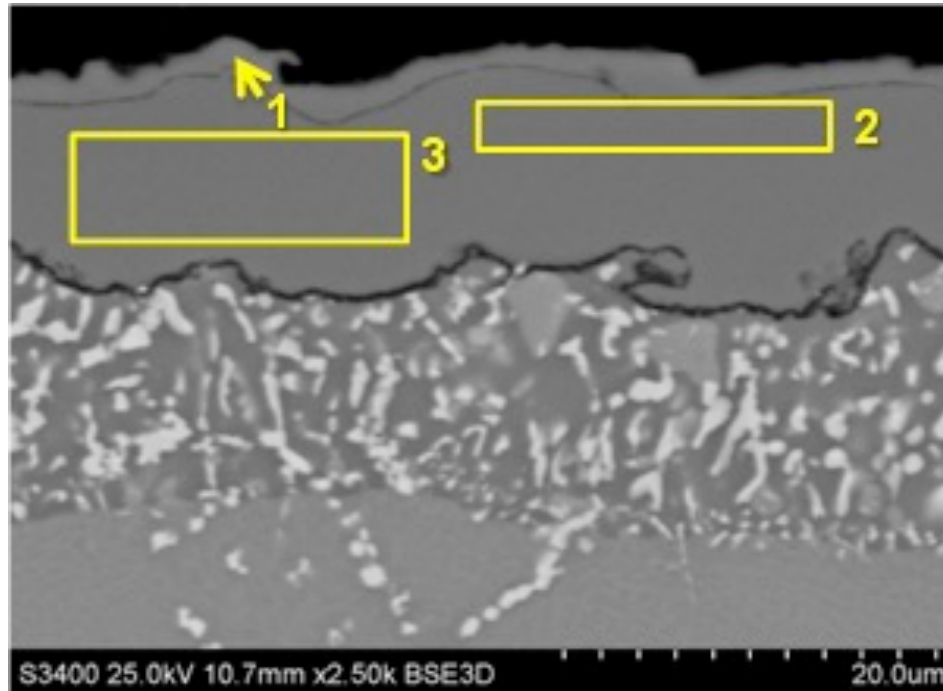


a) krawędź natarcia



b) koryto

Mikrostruktura warstwy aluminidkowej modyfikowanej Zr na łopatkcie turbiny



| Chemical composition (wt %) | | | | | | | |
|-----------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <i>Point/area</i> | <i>Al</i> | <i>Ti</i> | <i>Cr</i> | <i>Co</i> | <i>Ni</i> | <i>Zr</i> | <i>Mo</i> |
| 1 | 13.05 | 0.23 | 0.83 | 4.24 | 66.17 | 9.11 | 6.37 |
| 2 | 25.14 | 0.32 | 1.83 | 6.02 | 65.29 | 1.41 | |
| 3 | 24.44 | 0.70 | 2.69 | 6.12 | 64.33 | 1.72 | |

Porównanie zalet i wad różnych metod aluminiownia

| Cykl procesu | Pack cementation (w proszkach) | Out of pack (nad proszkiem) | CVD (gazowa) |
|---------------------------------------|--|---------------------------------------|------------------------|
| Czas cyklu | Wolne nagrzewanie | Szybkie nagrzewanie | Szybkie nagrzewanie |
| Powtarzalność | Mała | Dobra | Dobra |
| Skład chemiczny | Ograniczona kontrola | Ograniczona kontrola | Brak ograniczeń |
| Ośłona części niepokrywanej | Łatwa | Utrudniona | Utrudniona |
| Pokrywanie kanałów chłodzących | Bardzo trudne | Trudne | Ułatwione |
| Ilość zużywanych surowców | Duża | Mała | Mała |
| Stopień skomplikowania | Mały | Mały | Duży |
| Zapylenie | Duże | Małe | Brak |
| Materiały odpadowe | Problem | Mały problem | Brak |