

ZB 11

Materiały lotnicze o zaawansowanej strukturze (monokryształ, kierunkowa krystalizacja)

Partnerzy:

Politechnika Śląska – prof. Jan Cwajna

Politechnika Warszawska – prof. Krzysztof J. Kurzydłowski

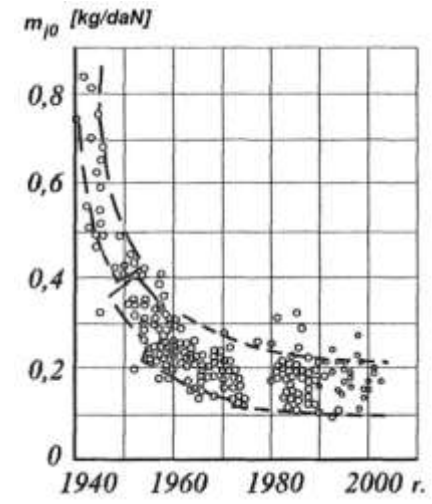
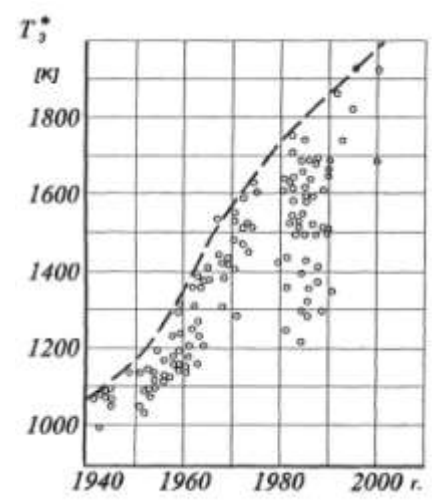
Politechnika Rzeszowska – dr hab. inż. Krzysztof Kubiak

Koordynator ZB 11 – Politechnika Rzeszowska

Politechnika Rzeszowska

Opracowano założenia i przyjęto kryteria konstrukcyjne rdzeniowanych monokrystalicznych odlewów elementów konstrukcyjnych dla przemysłu lotniczego

Temperatura spiętrzenia spalin przed turbiną w warunkach startowych statycznych na ziemi



Masa jednostkowa silnika w warunkach startowych statycznych na ziemi

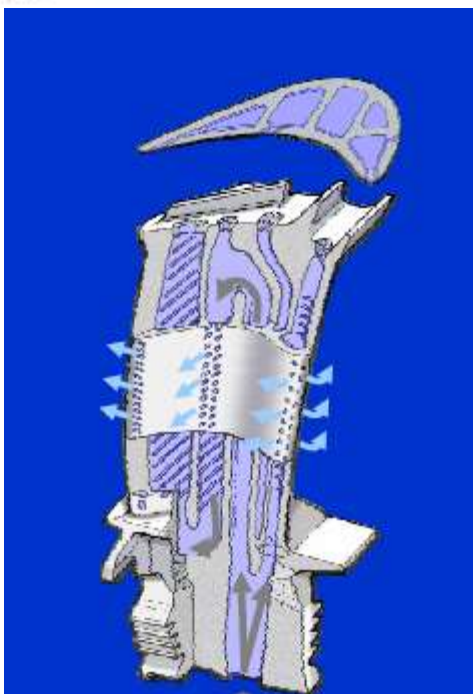
Zapotrzebowanie przemysłu silnikowego na tworzywa konstrukcyjne o dużej wytrzymałości zmęczeniowej, odporności na pełzanie oraz dobrej odporności na korozję w środowisku spalin o wysokiej temperaturze - żaroodporność

Określono krytyczne warunki pracy elementów monokrystalicznych w silnikach lotniczych



Silnik F100-PW-229
(stosowany w F-16A)

Monokrystaliczna
rdzeniowana łopátka
turbiny sprężarki



Temp. - do 1050°C

Temp. - do 950°C

Temp. gazów – do 1450°C

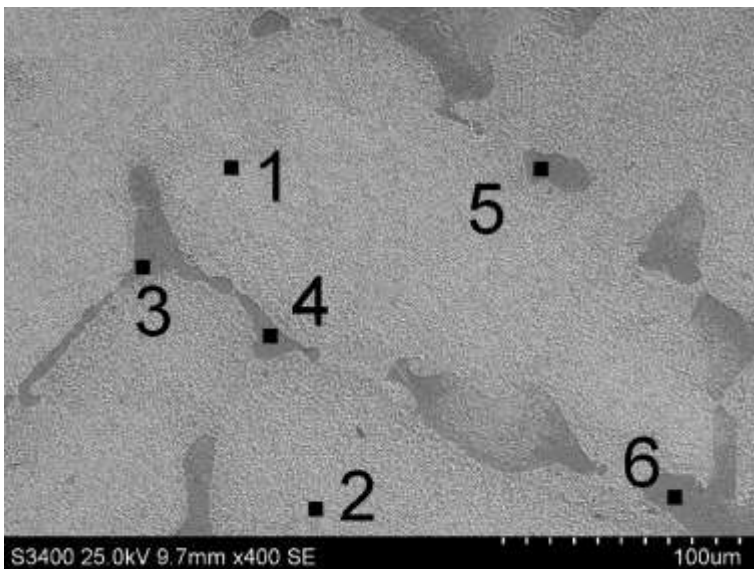
Skład chemiczny nadstopu niklu **CMSX-4** wybranego do wytwarzania monokrystalicznych elementów silników lotniczych

Zawartość pierwiastków, % mas.								
Cr	Co	Mo	Al	Ti	Ta	Hf	Re	Ni
6,5	9,0	0,6	5,6	1,0	6,5	0,1	3,0	Osnowa

Kryteria doboru:

- zastosowanie – ok. 90 % wszystkich wyrobów komercyjnych,
- dostępność – możliwość zakupu w CM – USA,
- cena – 3-4 krotnie niższa od stopów V generacji,
- doświadczenie w odlewaniu.

Przetarg zrealizowano – zakupiono 200 kg stopu (ok. 400 tys. zł)



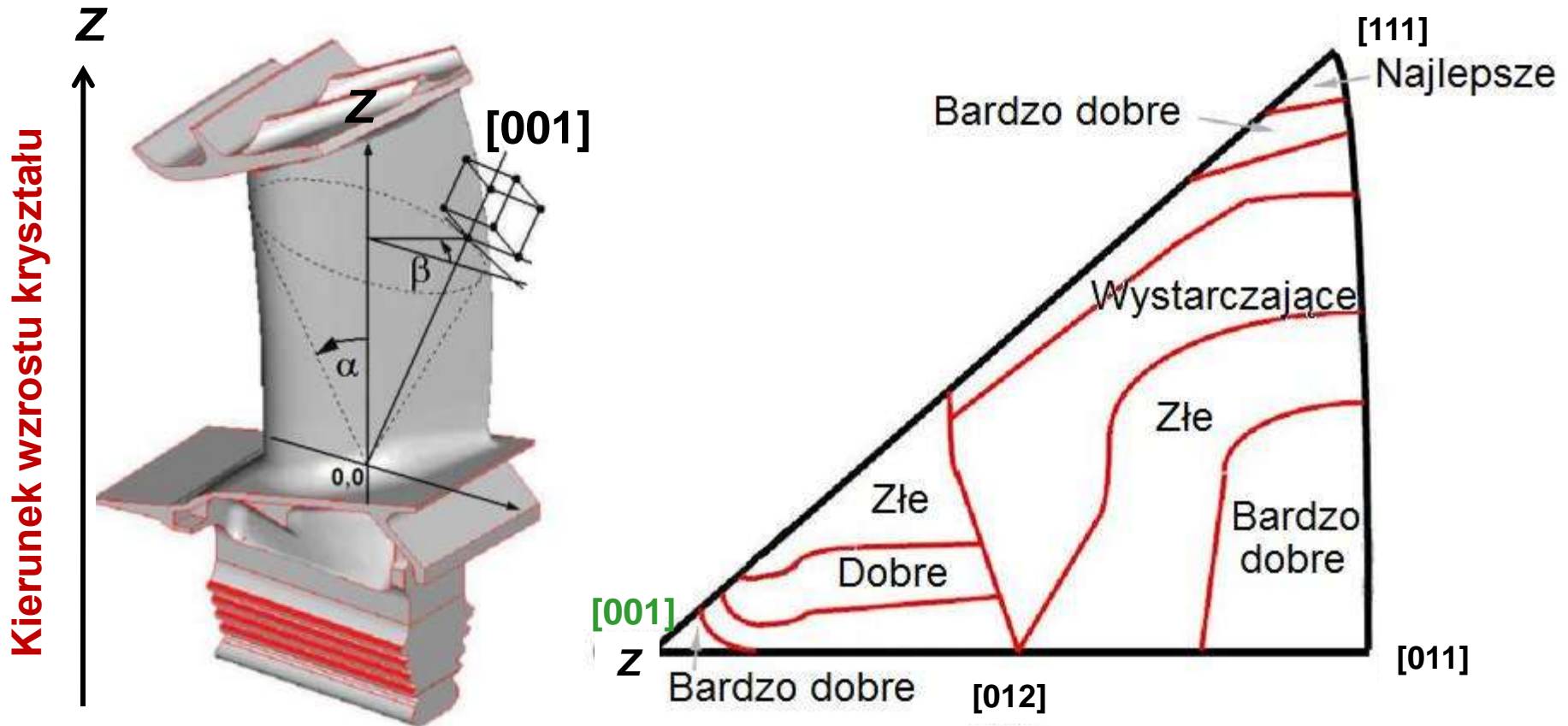
Obróbka cieplna:

- Przesycanie 1340⁰ C
- Starzenie: wielostopniowe po nakładaniu warstw żaroodpornych

Rozstrzygnięty przetarg na piec próżniowy: chłodzenie Ar lub He !!!!!!!
ALD – 2,5 mln zł

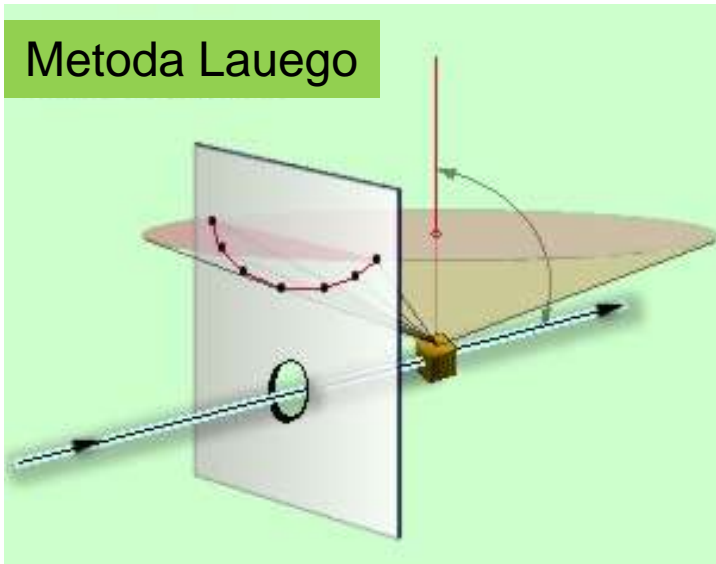
Pierwiastek	Zawartość pierwiastka, % mas. w mikroobszarach					
	1	2	3	4	5	6
Al	6,07	6,49	8,63	9,44	8,23	8,61
Ti	1,08	1,09	0,99	0,78	0,77	0,97
Cr	6,95	7,69	4,01	4,58	3,36	3,73
Co	10,70	11,78	9,07	9,47	8,67	8,19
Ni	66,33	65,59	72,75	71,60	74,62	73,16
Ta	8,86	7,37	3,24	3,03	3,04	3,83

Opracowanie metodyki badań doskonałości monokryształów i monokryształów rdzeniowanych

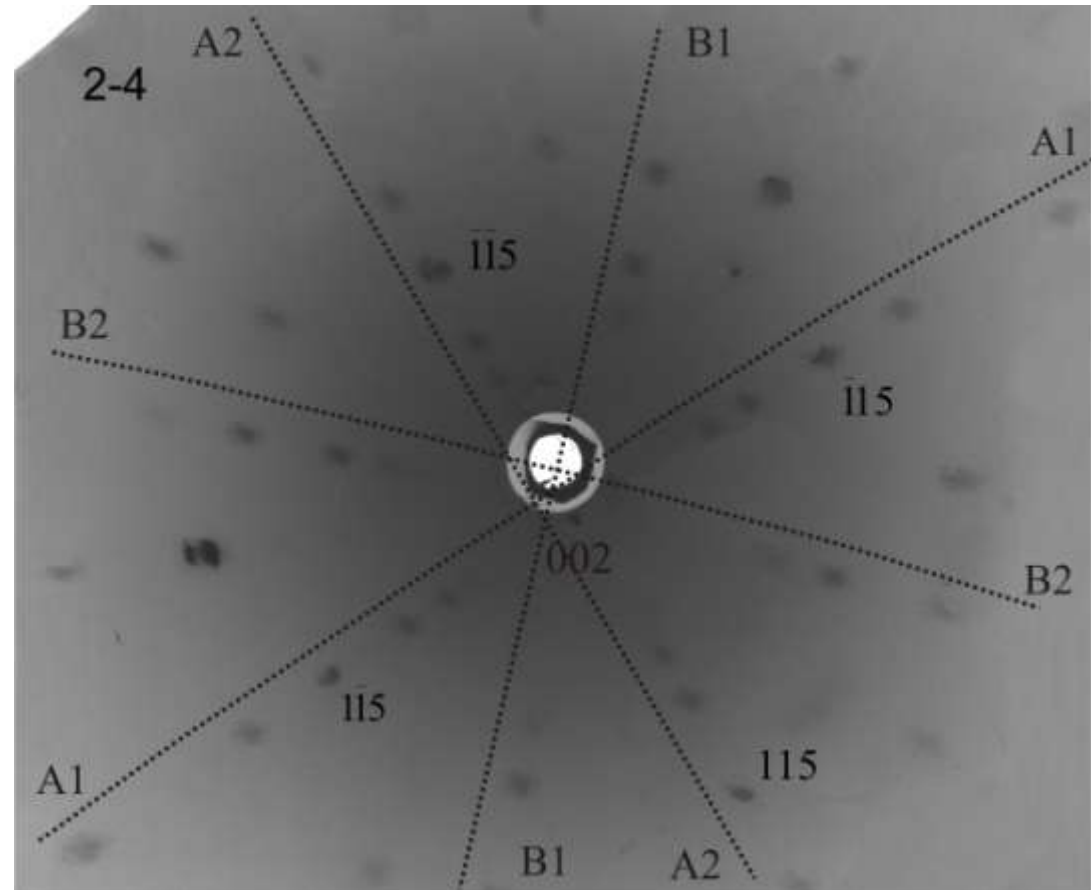


Zależności między orientacją krystaliczną i właściwościami
(odpornością na pełzanie) monokrystalicznego nadstopu CMSX-4

Orientacja krystaliczna monokrystalicznych łopatek z nadstopu niklu CMSX-4



Schemat metody



Lauegram dla monokrystalicznej łopatki z nadstopu niklu CMSX-4 otrzymanej przy prędkości wyciągania **2 mm/min**

Wyniki badań – orientacja krystaliczna (metoda Lauego)

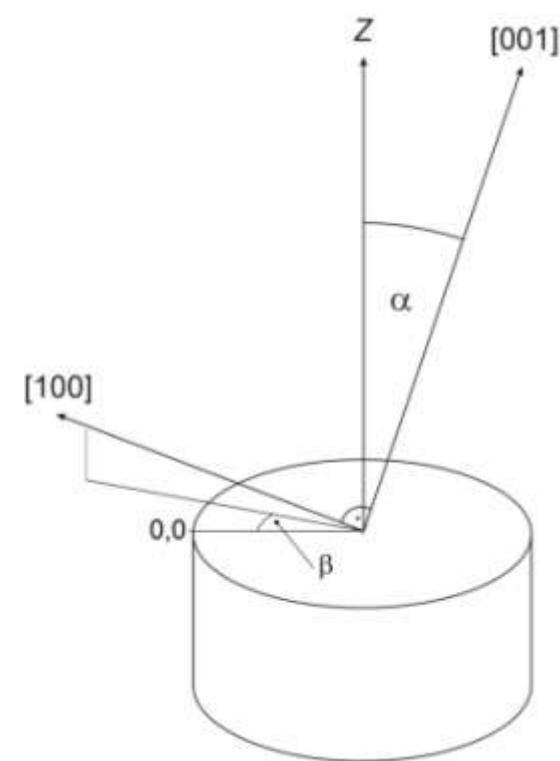
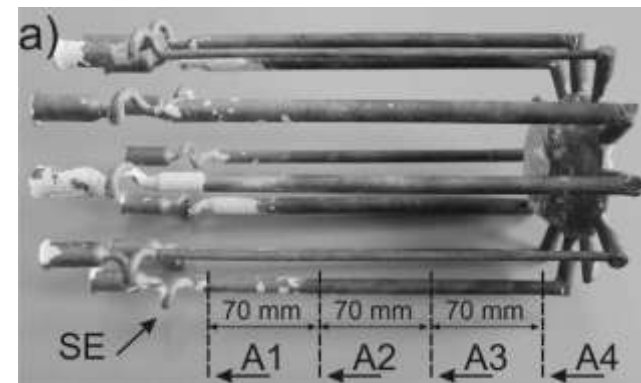
Pręty monokrystaliczne

Kąty odchylenia osi krystalicznych dla prętów monokrystalicznych – prędkość wyciągania **$v=3\text{mm/min}$**

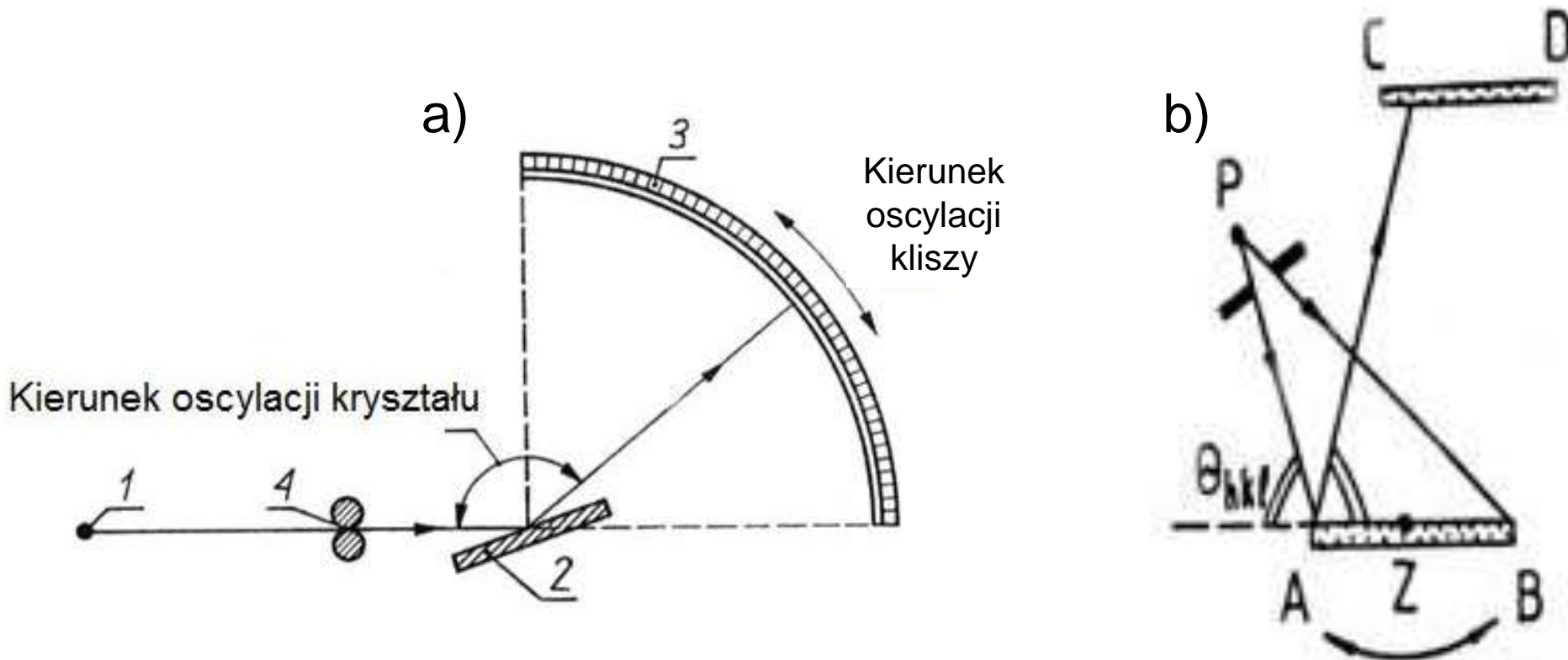
Próbka	$\alpha \pm 1^\circ$	$\beta \pm 1^\circ$
A1	4.5 °	+5.0°
A2	4.5°	+10.0°
A3	5.0°	+12.0°
A4	6.0°	+16.0°

Kąty odchylenia osi krystalicznych dla prętów monokrystalicznych – prędkość wyciągania **$v=4\text{mm/min}$**

Próbka	$\alpha \pm 1^\circ$	$\beta \pm 1^\circ$
B1	33.2°	+21.0°
B2	32.5°	+15.0°
B3	29.1°	+18.0°
B4	29.7°	+43.0°



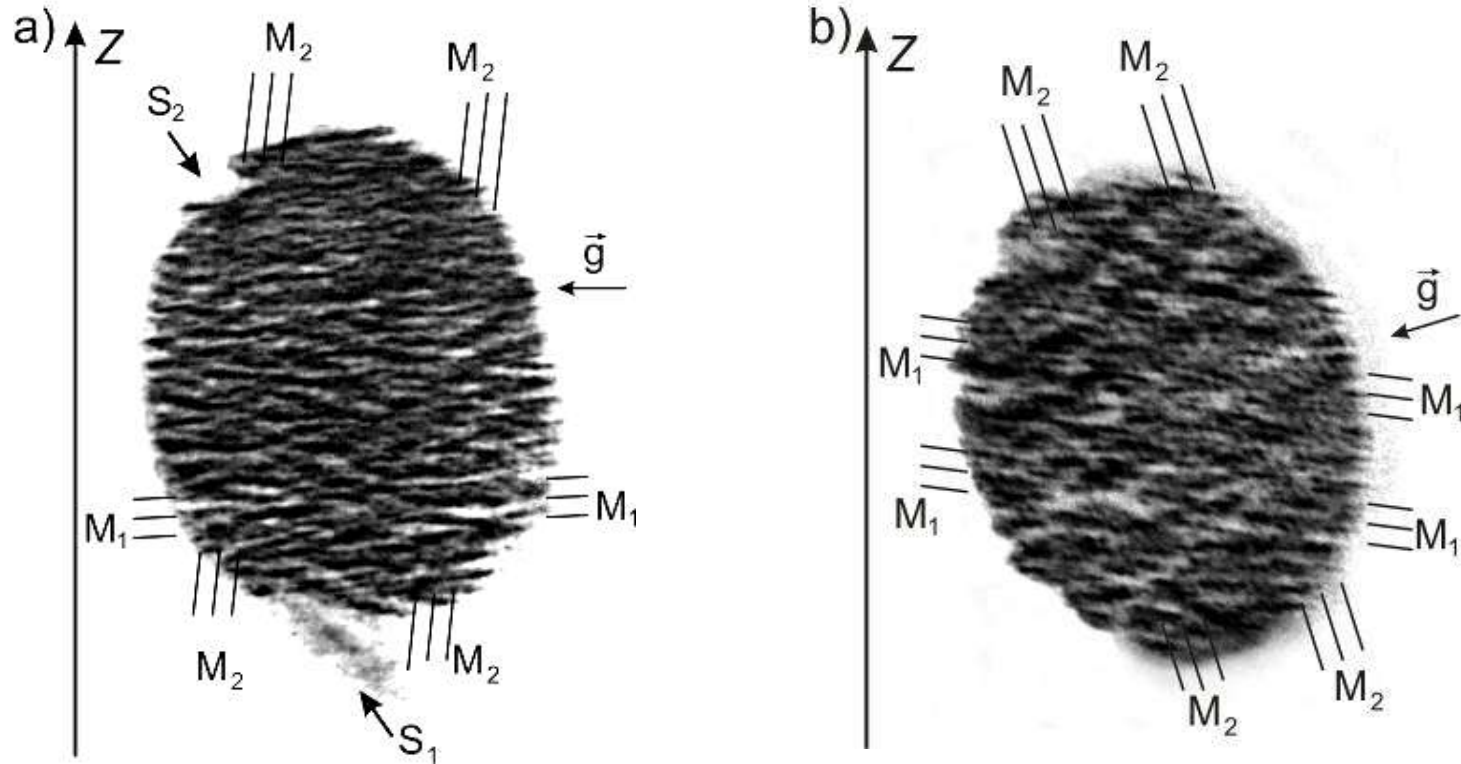
Metoda Auleytnera do badań doskonałości krystalicznej monokryształów



Bieg promieni w metodzie Auleytnera:

- a) tradycyjnej: 1 – ognisko punktowe, 2 – kryształ, 3 – kasetta z filmem, 4 – szczelina,
 b) z szeroką wiązką: P – ognisko punktowe, Z – oscylujący kryształ, CD – kasetta z filmem,
 Θ_{hkl} – kąt padania promieni na próbkę

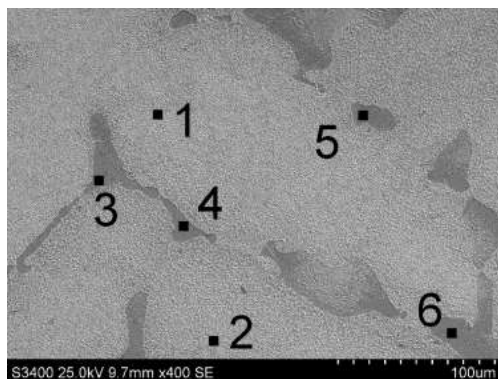
Wyniki badań – topografia rentgenowska (metoda Auleytnera z szeroką wiązką) Pręty monokrystaliczne



Topogramy rentgenowskie monokrystalicznych prętów –
 prędkości wyciągania: a) **3mm/min** (refleks [002] fazy γ') oraz b) **4mm/min**
 (refleks 022 fazy γ').

Z - oś oscylacji próbki, \vec{g} - wektor dyfrakcji, M_1 i M_2 - kierunki pasm kontrastu,
 S_1 i S_2 – miejsca o znacznych naprężeniach. Promieniowanie $Co_{K\alpha}$.

Wyniki badań – skład chemiczny w mikroobszarach Pręty monokrystaliczne



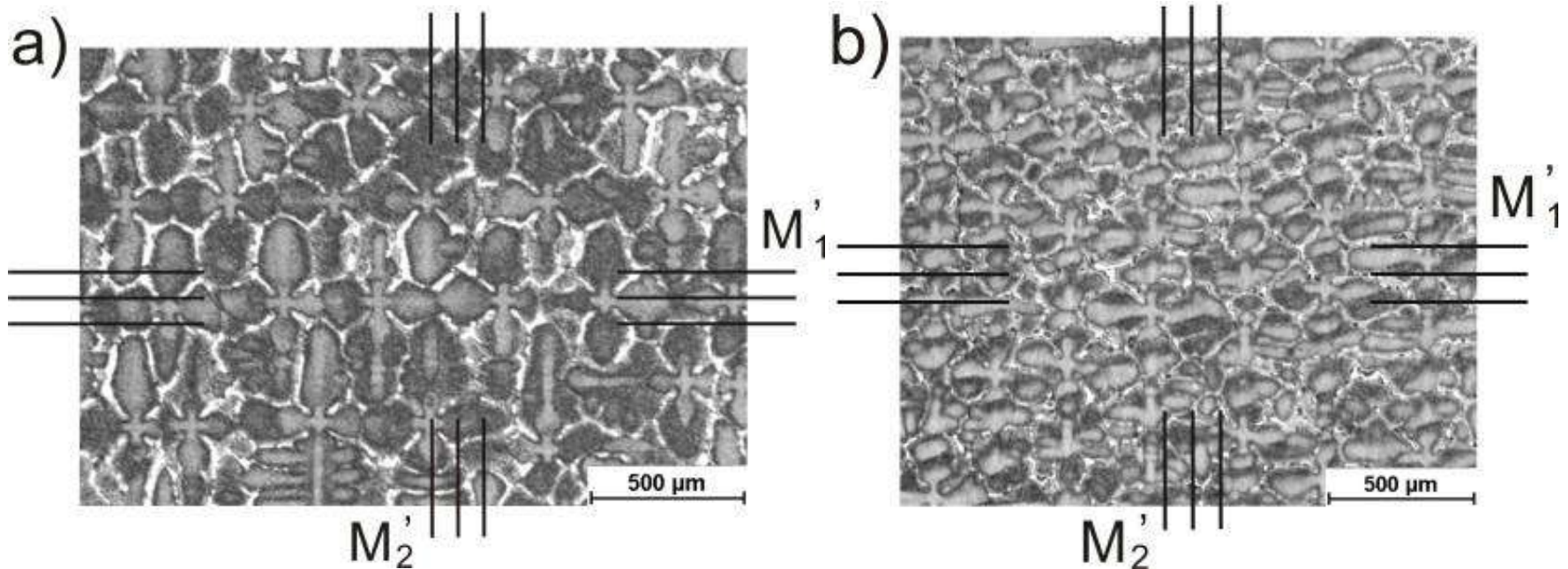
Mikrostruktura monokrystalicznego nadstopu CMSX-4

Skład chemiczny w wybranych mikroobszarach monokryształu z nadstopu CMSX-4

Pierwiastek	Zawartość pierwiastka, % mas. w mikroobszarach					
	1	2	3	4	5	6
Al	6,07	6,49	8,63	9,44	8,23	8,61
Ti	1,08	1,09	0,99	0,78	0,77	0,97
Cr	6,95	7,69	4,01	4,58	3,36	3,73
Co	10,70	11,78	9,07	9,47	8,67	8,19
Ni	66,33	65,59	72,75	71,60	74,62	73,16
Ta	8,86	7,37	3,24	3,03	3,04	3,83

Wniosek: pasma S_1 i S_2 na topogramach rentgenowskich pochodzą z różnic w składzie chemicznym pomiędzy obszarami dendrytów, a obszarami międzydendrytycznymi

Wyniki badań – mikrostruktura Pręty monokrystaliczne



Mikrostruktura prętów monokrystalicznych wyciąganych z prędkością:

a) 3 mm/min,

b) 4 mm/min

M_1' i M_2' - ortogonalne kierunki ramion dendrytów

Wniosek: pasma M_1' i M_2' na mikrostrukturze odpowiadają położeniem pasmom na topogramach rentgenowskich



Wnioski:

- Prędkość wyciągania w procesie monokryształizacji wpływa na doskonałość strukturalną odlewów – prętów.
Odlewy krystalizowane z prędkością od 3 do 4 mm/min posiadają najlepszą doskonałość strukturalną.
- Odchylenie kierunku [001] od osi wzrostu monokryształu (kąt α) zależy od prędkości wyciągania i kształtu odlewu, np. dla prętów kąt α zwiększa się ok. 7 razy wraz ze zmianą prędkości wyciągania od 3 do 4 mm/min.
- Metody Laue'go i Auleytnera umożliwiają pełną ocenę symetrii monokryształów. Odwzorowanie czterokrotnej osi symetrii fazy umacniającej może stanowić kryterium oceny doskonałości strukturalnej wieloskładnikowych monokryształicznych odlewów prętów.



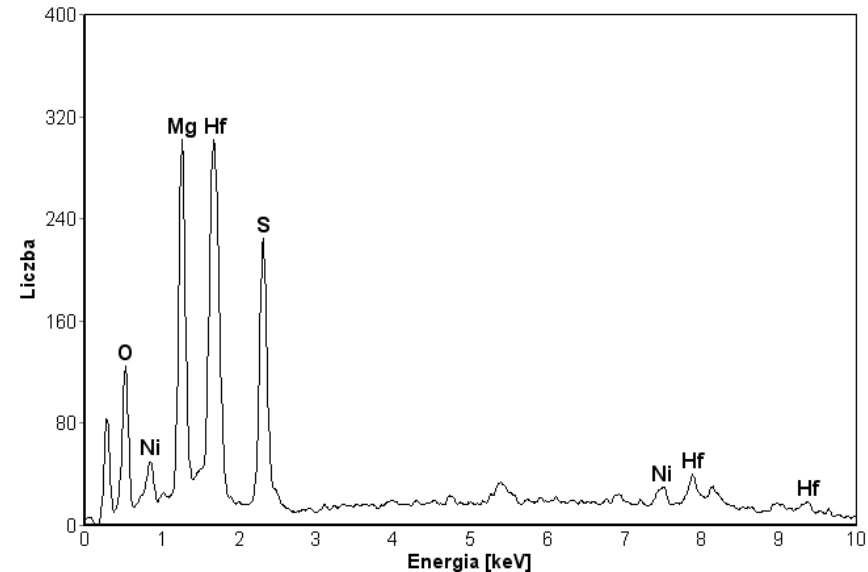
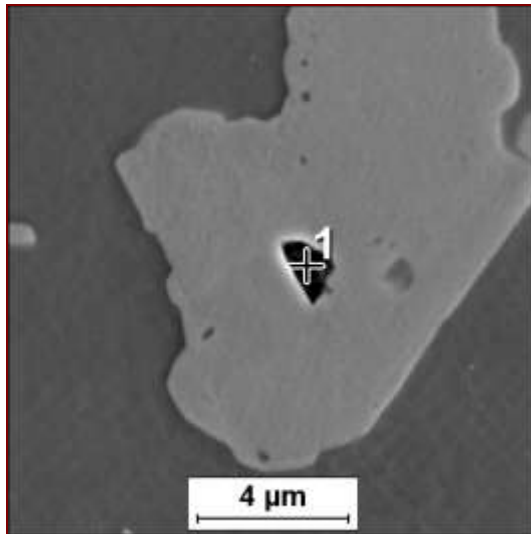
Dyfraktometr rentgenowski

RIGAKU

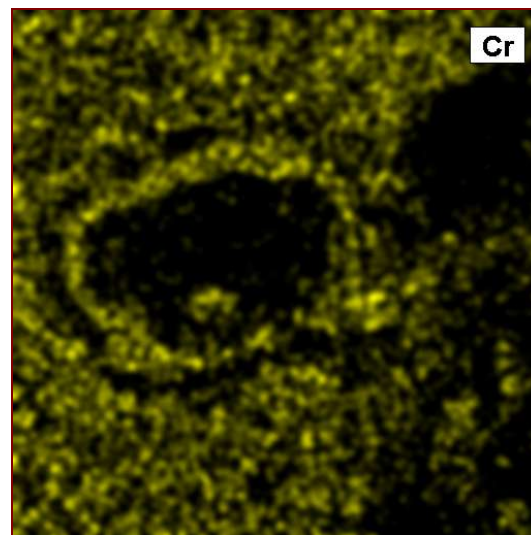
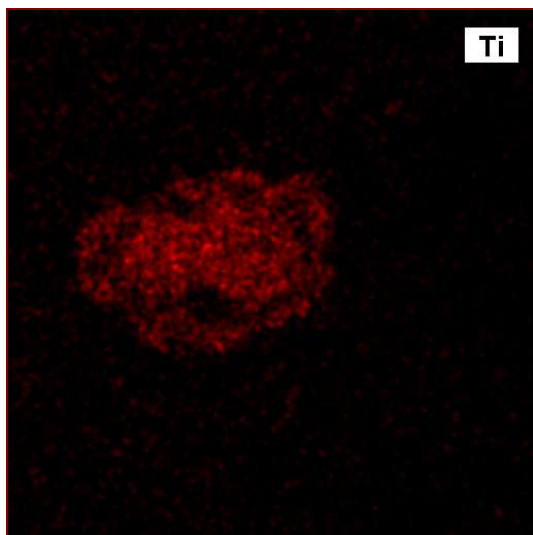
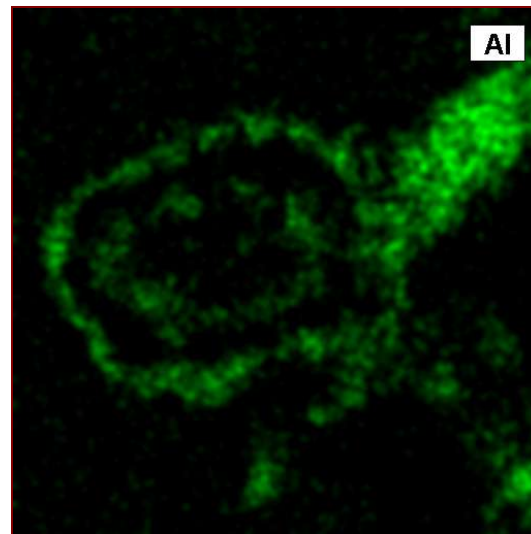
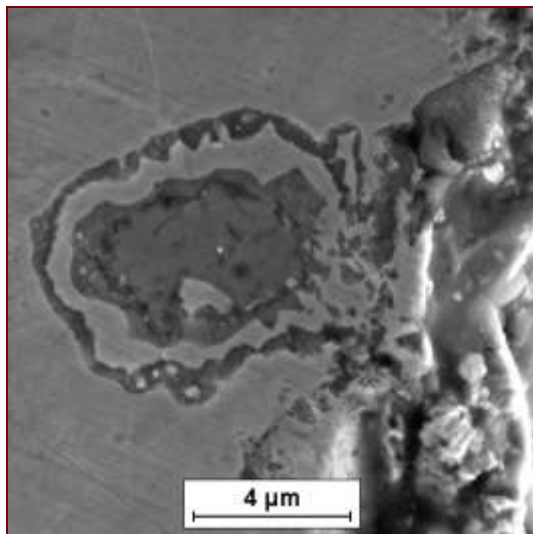
Zakupiony – instalacja 21 grudzień 2009

Politechnika Śląska

Opracowano metody i procedury oceny czystości metalurgicznej stopów wsadowych i rdzeniowanych odlewów monokrystalicznych



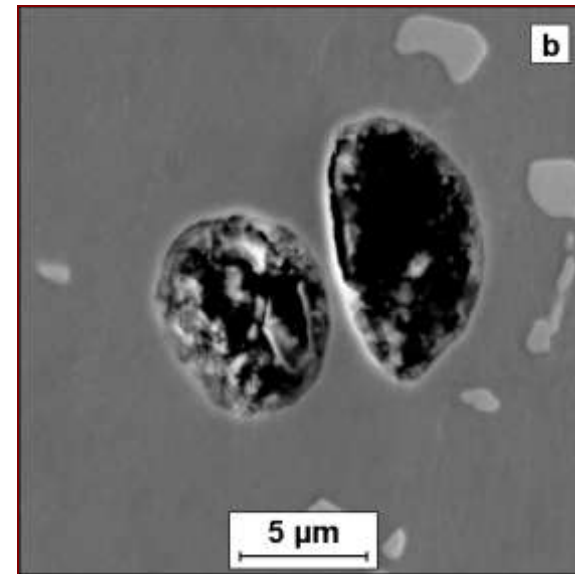
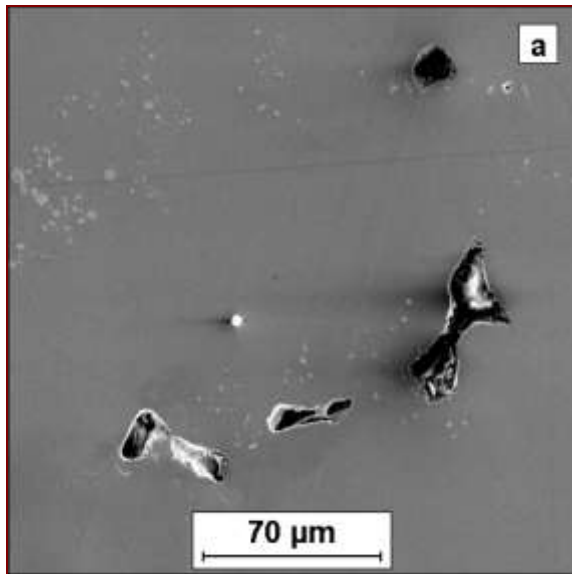
Węglik hafnu wykrystalizowany na wtrąceniu bogatym w magnez, siarkę i tlen w nadstopie niklu René142DS



*Mikroskop elektronowy
skaningowy (SE)
ze spektrometrem EDS
(mapping)*

Węglik i złożone
wtrącenia
niemetaliczne w
warstwie
powierzchniowej
łopatki
w nadstopie niklu
René142DS

Opracowano metody i procedury oceny porowatości gazowej i skurczowej rdzeniowanych odlewów monokrystalicznych



Pory skurczowych (a) i gazowe (b) w łopatkce z nadstopu niklu René142DS

Opracowanie metod i procedur jakościowej i ilościowej oceny makrostruktury rdzeniowanych odlewów monokrystalicznych

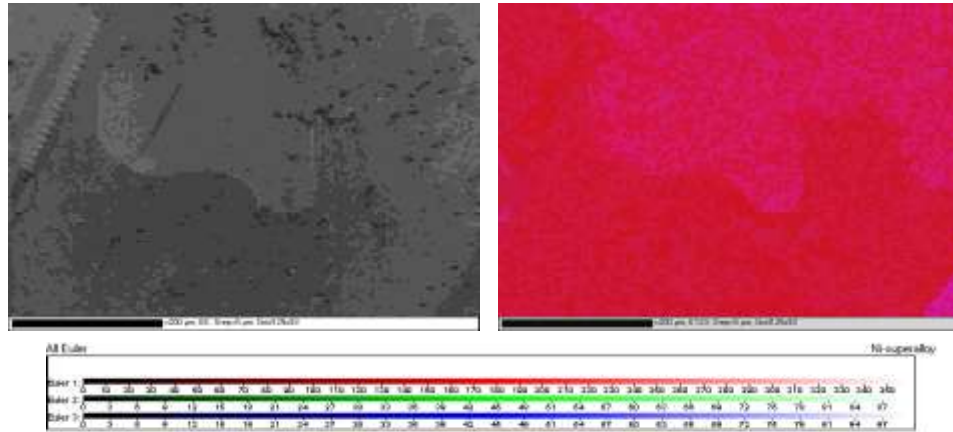


Trawiono w odczynniku Marble



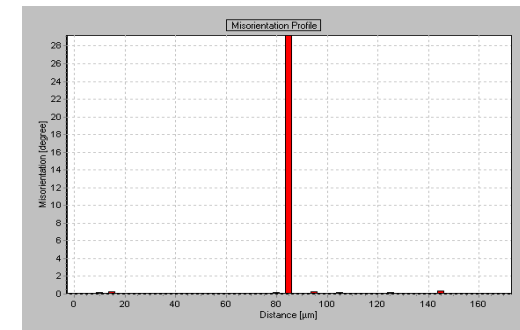
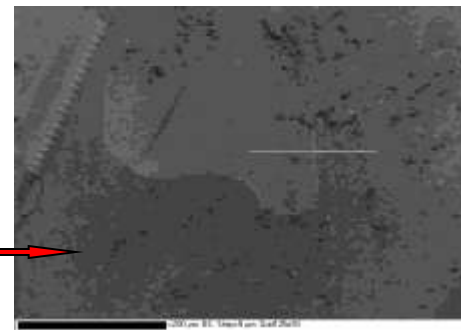
Trawiono w FeCl_3

Opracowanie metod oceny tekstury oraz pomiarów naprężeń własnych w rdzeniowanych odlewach monokrystalicznych



Mapa orientacji na przekroju poprzecznym

Deorientacja granicy ziaren na przekroju poprzecznym
Obraz FSE (Forescatter Electrons)
 kontrast orientacyjny -



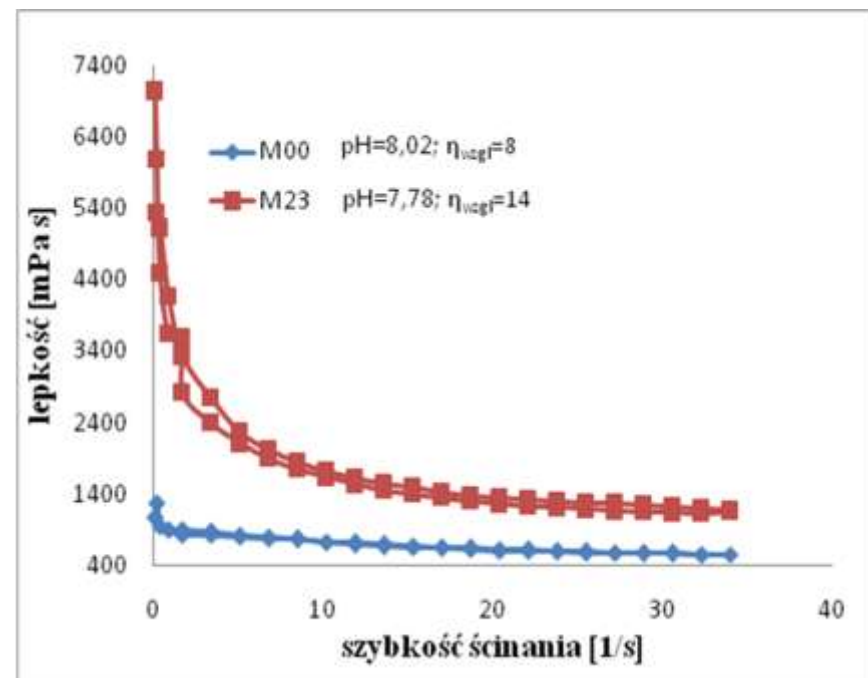
Przykład oceny orientacji krystalograficznej ziaren pierwotnych - przekrój poprzeczny dolnej części pióra kierunkowo krzepnącej łopatki z nadstopu łopatki René142DS

Politechnika Warszawska

Opracowano złożenia technologiczne procesu wytwarzania mieszanek formierskich i rdzeniowych oraz ich kontroli

Mieszanka podstawowa dla form:

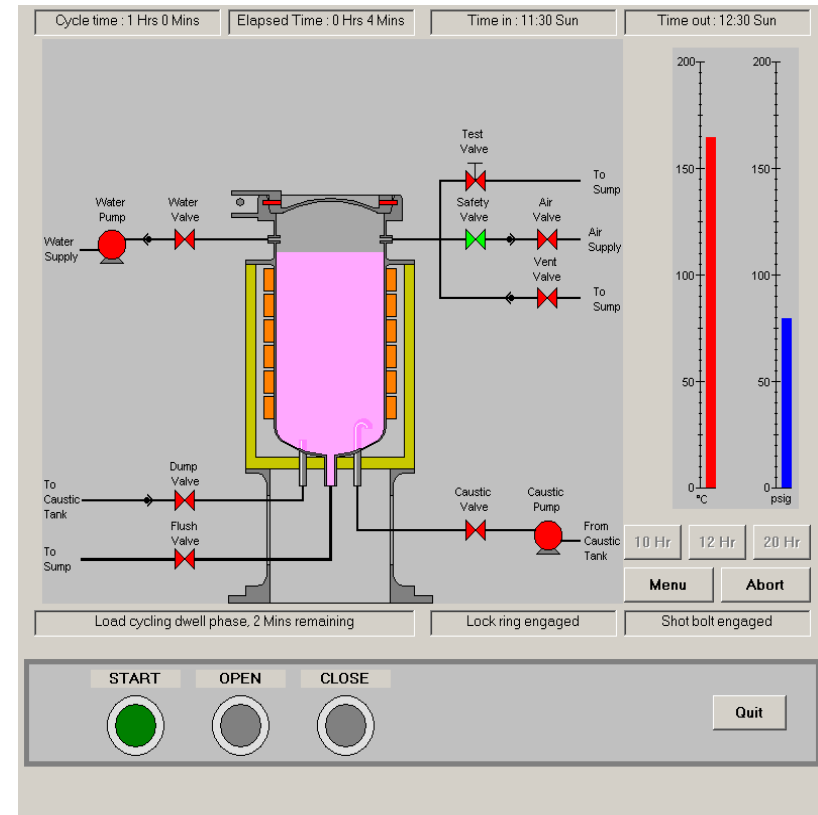
- 76%wag. fazy stałej
 - 50%wag. proszek Al₂O₃ #200,
 - 50%wag. proszek Al₂O₃ #325,
- 24%wag. spoiwo Ludox AM,
- środki antypienne (0,1%obj),
- zwilżacz – (0,1%obj).



Przeprowadzono testy laboratoryjne mieszanek formierskich na osnowie Al_2O_3 . Opracowano założenia technologiczne procesu wymywania rdzeni ceramicznych z odlewów – testy prowadzono w autoklawie odlewni precyzyjnej WSK „PZL-Rzeszów”

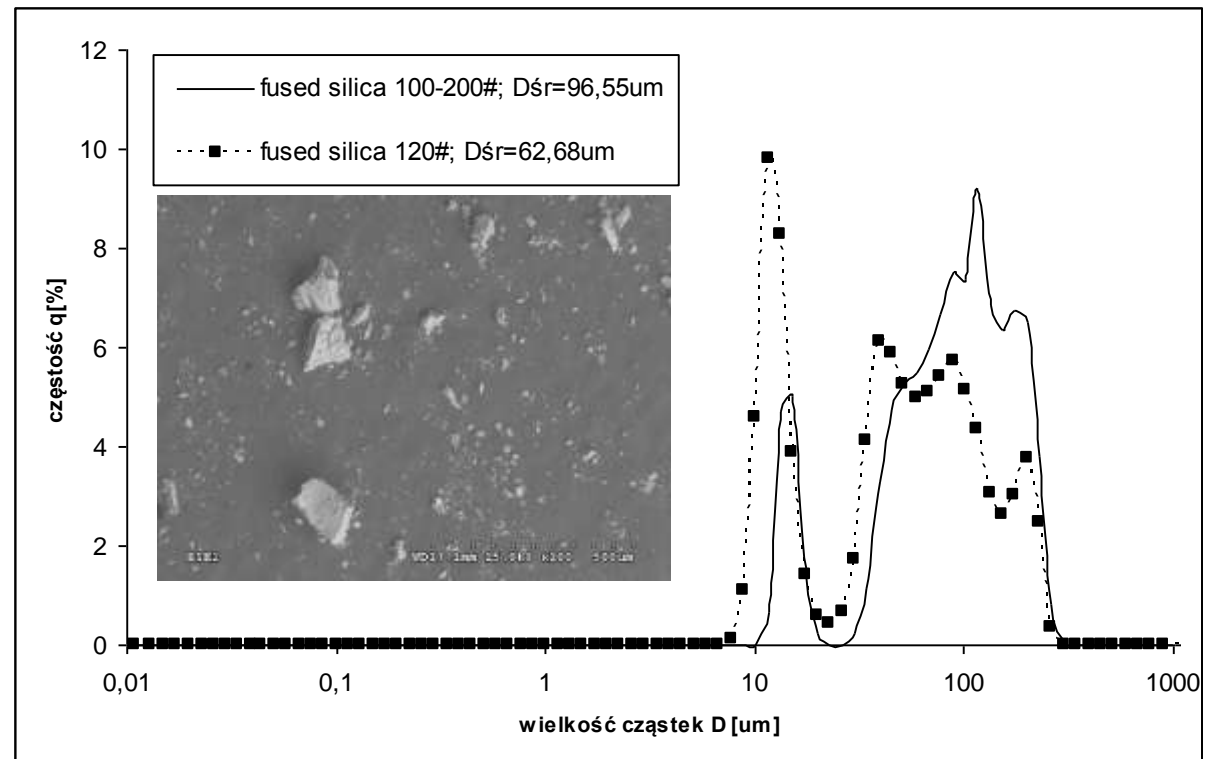
Mieszanka podstawowa dla rdzeni:

- 35% fused SiO_2 (-120#)
- 35% fused SiO_2 (-325#)
- 10% zircon (-325#)
- 10% High MPt wok
- 10% Low MPt wok

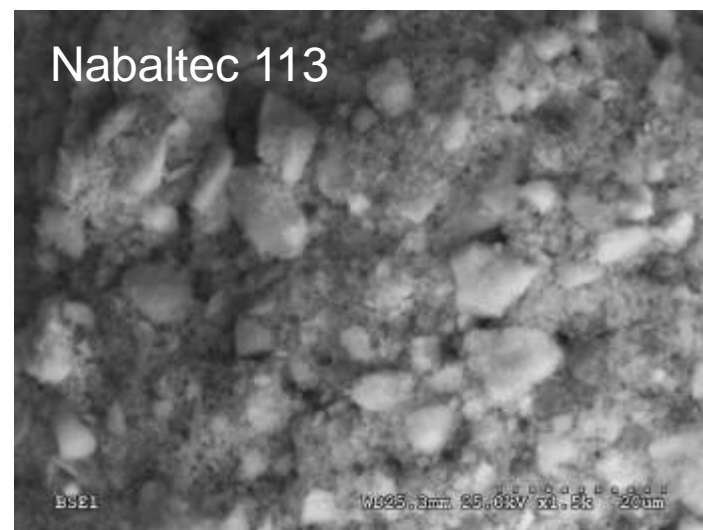


Wykonano badania materiałoznawcze (SEM, PSD, XRF, XRD) próbek materiałów proszkowych (SiO₂ i fused, ZrSiO₄, Al₂O₃) do wytwarzania rdzeni ceramicznych

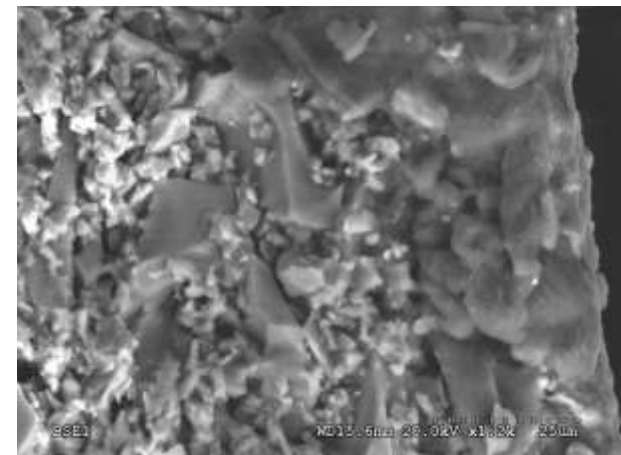
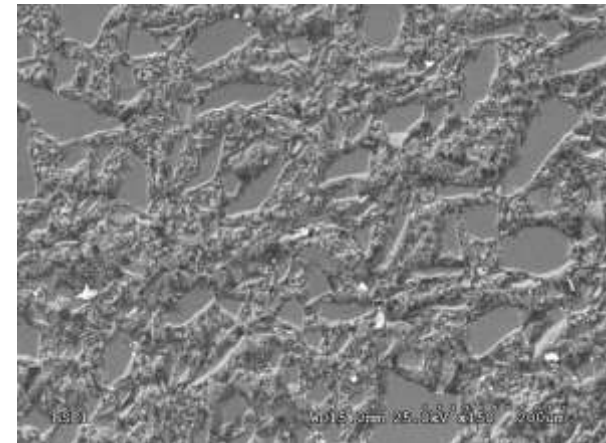
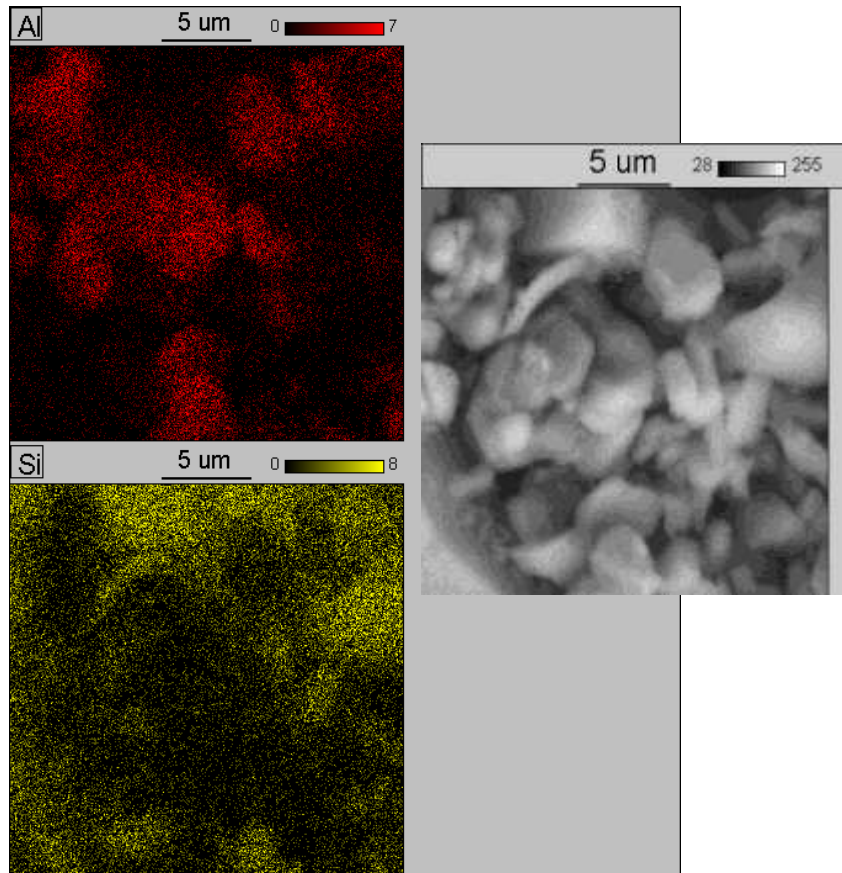
Próbka	SiO ₂ -120#	SiO ₂ -100-200#
	% wag	
SiO ₂	99,831	99,856
Al ₂ O ₃	0,022	0,018
Fe ₂ O ₃	0,033	0,022
MgO	0,057	0,051
CaO	0,085	0,065
Na ₂ O	0,019	0,033
P ₂ O ₅	0,011	0,009
SO ₃	0,067	0,053
BaO	0,023	0,014
Suma	100,148	100,121

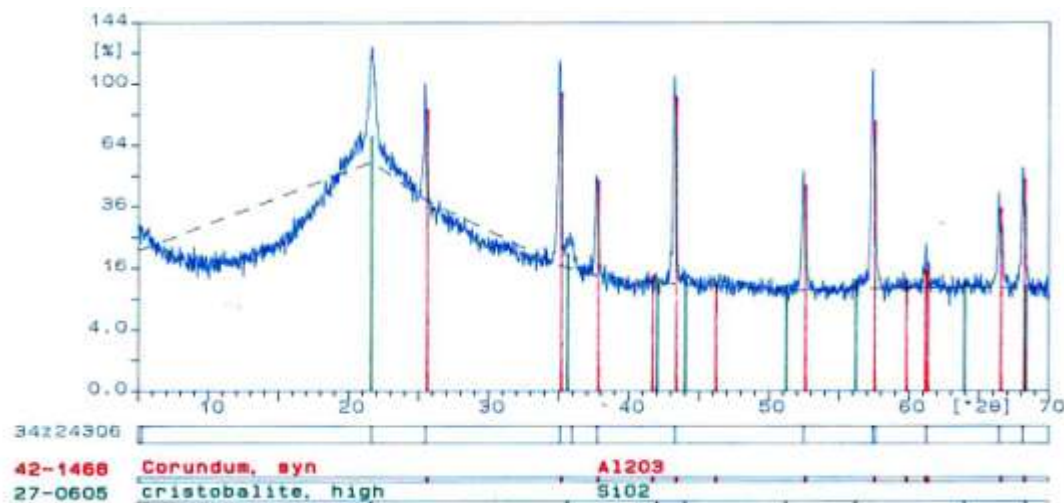


% wag	Krzemian cyrkonu ZrSiO₄
SiO₂	30,56
Al₂O₃	Poniżej poziomu oznaczenia XRF
Fe₂O₃	0,31
CaO	0,18
MgO	0,07
K₂O	Poniżej poziomu oznaczenia XRF
Na₂O	0,17
ZrO₂	64,48
HfO₂	1,28
Y₂O₃	0,18
Zn	0,013
Mn	0,009



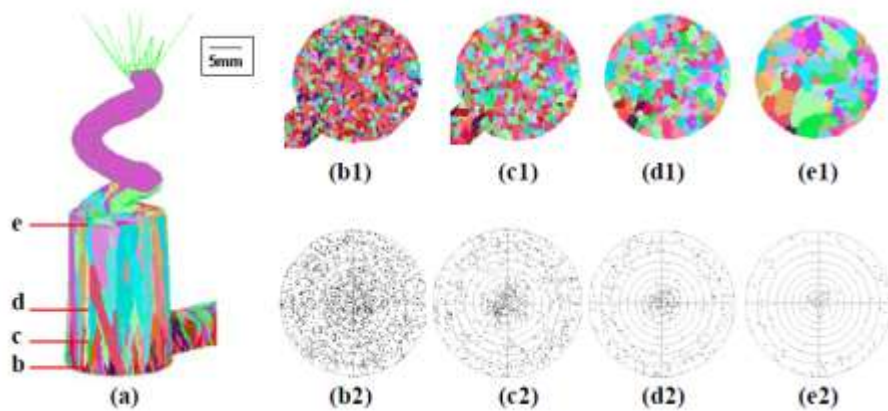
Właściwości mechaniczne, cieplne i porowatość form i rdzeni ceramicznych do odlewania monokrystalicznych rdzeniowanych elementów konstrukcyjnych dla przemysłu lotniczego





Próbka	Skład fazowy metodą dyfrakcji rentgenowskiej	
	jakościowy	ilościowy , %wag.
Próbka rdzenia 1 (duży)	Faza amorficzna α -Al ₂ O ₃ korund SiO ₂ - krystobalit	79,2 ± 0,2 16,9 ± 0,1 3,9 ± 0,1
<i>Dane producenta</i>		
	<i>SiO₂ - krystobalit</i>	4

Symulacja numeryczna procesu zalewania i krystalizacji rdzeniowanych monokrystalicznych odlewów



Konfiguracja programu ProCAST do symulacji odlewania rdzeniowanych wyrobów monokrystalicznych – określenie warunków brzegowych procesu (właściwości stopu, rdzenia i formy)

W roku 2010 konieczne jest wykonanie badań właściwości wytworzonych form i rdzeni – niepełne dane w bazach materiałowych



Wskaźniki uzyskane w ZB 11

Liczba instytucji naukowych objętych wsparciem	3
Liczba naukowców realizujących projekt (kobiety)	47 (9)
Liczba studentów biorących udział w projekcie	3
Liczba doktorantów biorących udział w projekcie	2
Liczba przedsiębiorstw współpracujących	2
Liczba stopni naukowych mgr uzyskanych/realizowanych	1/1
Liczba publikacji powstałych wskutek realizacji projektu	3
Wizyty studyjne – na bieżąco z WSK „PZL-Rzeszów „S. A. i ICE „CEREL”	

Zamierzenia na rok 2010

- Instalacja wtryskarki i pieca do OC rdzeni ceramicznych,
- Wykonanie matryc do rdzeni ceramicznych,
- Wykonanie form silikonowych i matryc do modeli woskowych,
- Wykonanie form ceramicznych do rdzeniowanych odlewów monokrystalicznych,
- Wytworzenie odlewów, obróbka cieplna i badanie właściwości.

DZIĘKUJĘ ZA UWAGĘ

