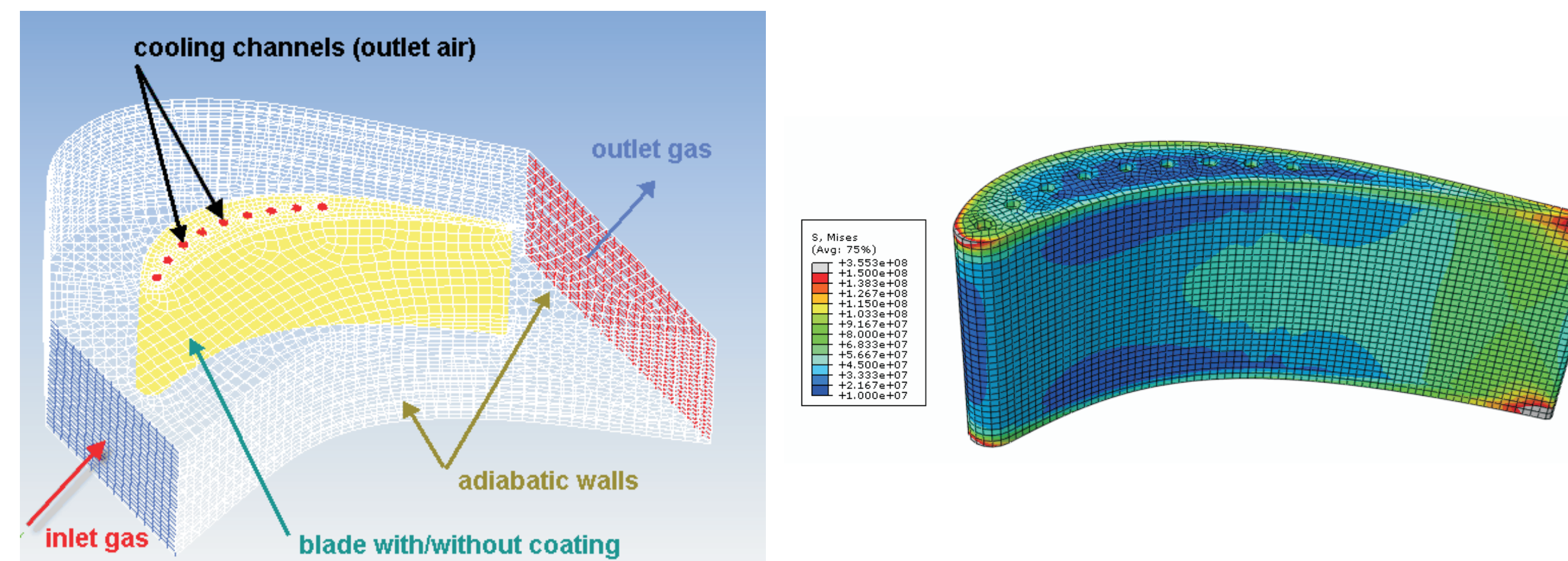


Nowoczesne pokrycia barierowe na krytycznej części silnika

Politechnika Śląska, Politechnika Warszawska, Politechnika Rzeszowska, Politechnika Lubelska, Uniwersytet Rzeszowski

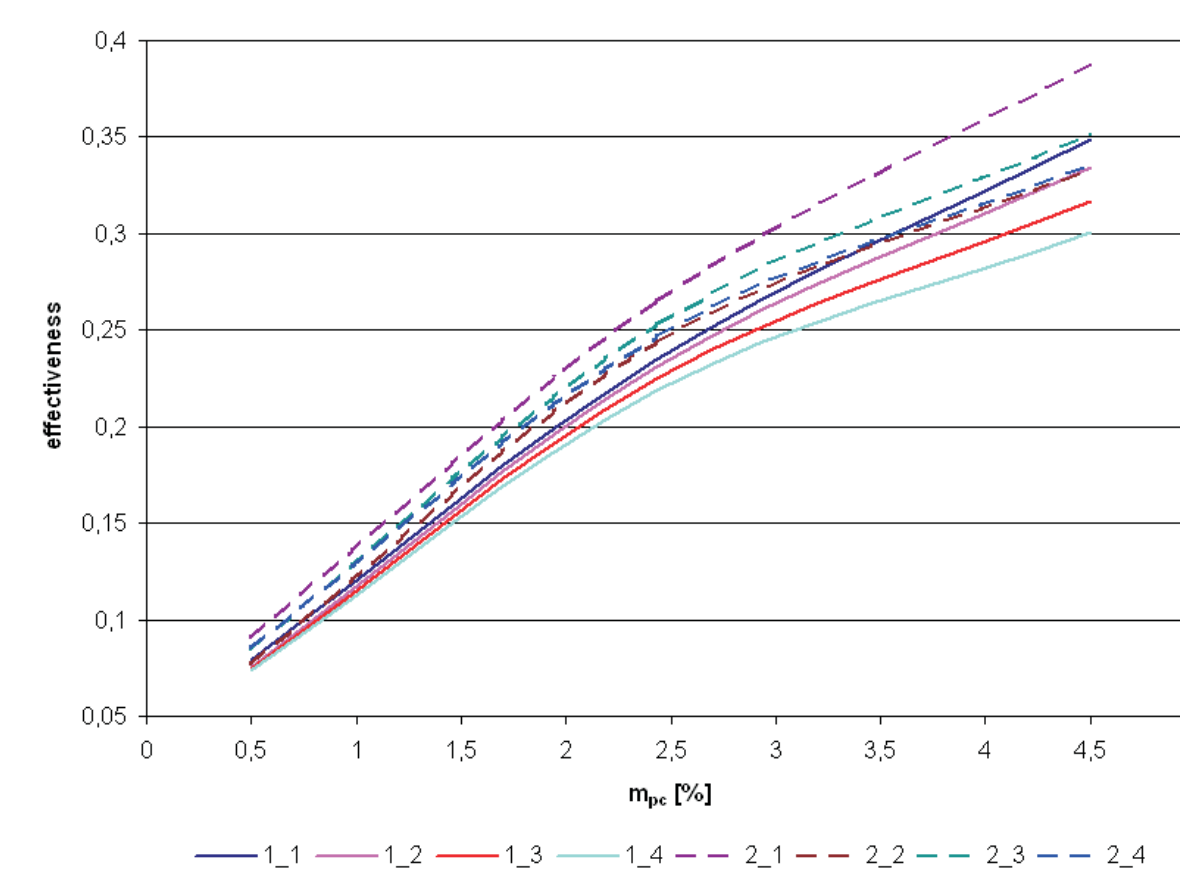
Wyniki badań

Badania dotyczyły wpływu ilości kanałów chłodzących o różnych średnicach na poziom naprężeń w łopatkach bez pokrycia ochronnego oraz z warstwą ceramiczną TBC MgZrO₃. Rozważane były łopatki z dziewięcioma, sześcioma, czterema oraz trzema cylindrycznymi kanałami chłodzącymi o średnicach odpowiednio: 1 mm, 1,25 mm, 1,5 mm, 1,75 mm. Pierwszy etap badań dotyczył nagrzewania łopatki do temperatury roboczej. Łopatki umieszczone były w kanale przez który przepływał gaz spalinyowy o temperaturze 1600 K, zaś temperatura przepływającego powietrza w kanałach chłodzących wynosiła 300 K. Dla wszystkich ośmiu przypadków stosowano te same warunki brzegowe. Dla pierwszego etapu badań wyznaczono także efektywność chłodzenia, która była największa dla łopatki z 9 otworami. Zastosowanie pokrycia ceramicznego spowodowało dodatkowo 10% wzrost tego parametru.



Wnioski

Rozpatrując punkt na krawędzi natarcia zaobserwowano, że im mniejsza liczba otwór a większa ich średnica tym otrzymujemy mniejsze naprężenia. Spadek naprężeń w łopatkach z najmniejszą liczbą otworów w odniesieniu do łopatki z 9 otworami wyniósł 15% dla łopatki bez pokrycia, oraz 45% dla łopatki z pokryciem TBC. Efektywność chłodzenia łopatek z pokryciami TBC jest około 10% większa w odniesieniu do łopatek bez pokrycia ochronnego. Poprawa efektywności chłodzenia ma wpływ na zmniejszenie ilości powietrza potrzebnego do chłodzenia łopatki a tym samym podniesienie sprawności silnika i w rezultacie zmniejszenia zużycia paliwa.



Wyniki badań

Opracowanie podstaw technologii oraz parametrów technologicznych wytwarzania nowych modyfikowanych powłok aluminiowych metodą CVD, w tym podpowłokowych barier ciepłych stanowiących alternatywę dla stosowanych międzywarstw typu MeCrAlY, na łopatkę turbin. Bariery ciepłe pozwalają na obniżenie temperatury elementów gorących silnika o ok. 150°C. Zewnętrzna warstwa ceramiczna nie chroni materiału podłoża przed korozją gazową. W żarowytrzymałych stopach niklu stosuje się warstwę pośrednią - pokrycia aluminiowe wytwarzane metodą CVD. Parametry eksploatacyjne międzywarstwy typu Ni/Al, której wytwarzanie prowadzono w procesie zapewniającym modyfikację składu chemicznego za pomocą hafnu decydują o właściwościach użytkowych bariery ciepłej. Badania mikrostruktury i głębokości poszczególnych stref warstwy aluminiowej prowadzono dla wybranych superstopów niklu i przy ustalonych wartościach parametrów technologicznych procesu aluminiowania. Celem badań było określenie pływu rodzaju materiału podłoża (gatunku stopu, jego składu fazowego i chemicznego) na proces wytwarzania warstwy aluminiowej (ocena mikrostruktury, głębokości poszczególnych stref, składu chemicznego oraz właściwości użytkowych). Proces CVD prowadzono w temperaturze 1020 °C i w czasie 2h przy ciśnieniu 150 hPa po modyfikowaniu hafnem.

Numer pomiaru	Strefa dyfuzyjna	Strefa zewnętrzna	Całkowita głębokość
1	7,03	12,9	19,93
2	3,55	11,3	14,85
3	6,92	10,1	17,02
4	8,98	10,02	18,10
Wartość średnia			6,395 10,83 17,23

Numer pomiaru	Strefa dyfuzyjna	Strefa zewnętrzna	Całkowita głębokość
1	7,34	8,7	16,04
2	9,35	7,2	16,55
3	10,54	10,3	21,04
4	7,81	8,9	16,71
5	8,05	8,5	16,55
Wartość średnia			8,76 8,658 17,418

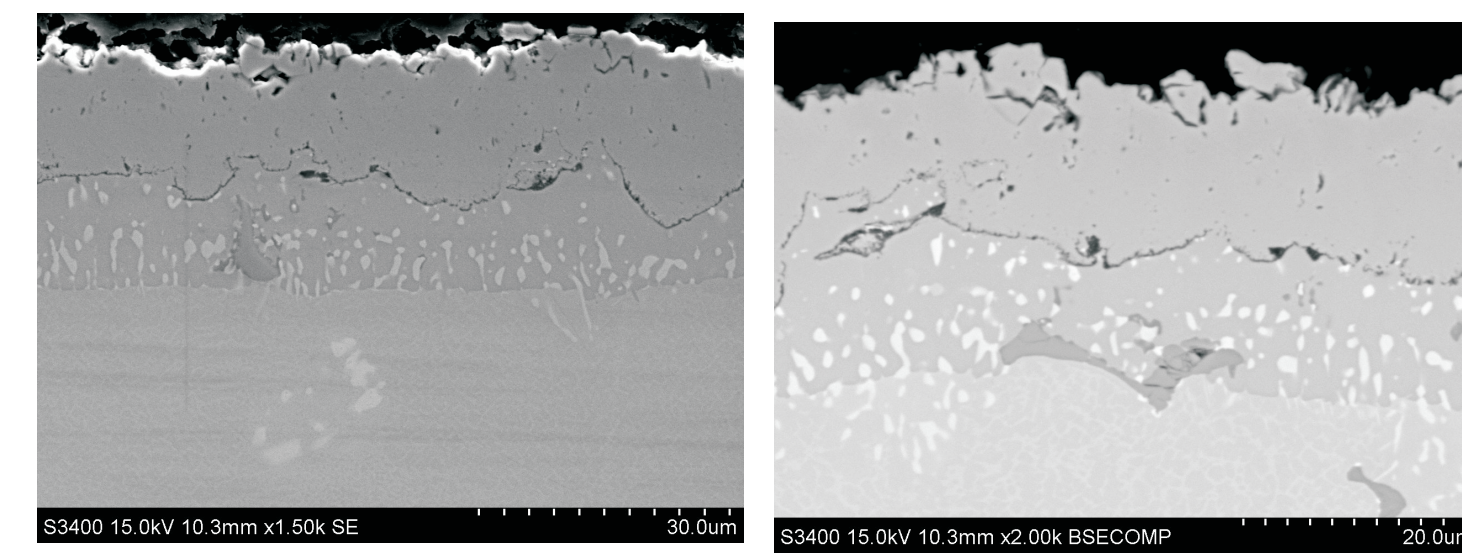
Proces CVD prowadzono w temperaturze 1020 °C i w czasie 3h przy ciśnieniu 150 hPa po modyfikowaniu hafnem

Numer pomiaru	Strefa dyfuzyjna	Strefa zewnętrzna	Całkowita głębokość
1	7,74	10,2	17,94
2	10,96	8,6	19,56
3	8,54	7,6	16,24
4	9,98	8,2	18,18
5	9,295	8,65	17,945
Wartość średnia			9,295 8,65 17,945

Numer pomiaru	Strefa dyfuzyjna	Strefa zewnętrzna	Całkowita głębokość
1	10,23	10,1	20,33
2	11,98	12,0	23,98
3	7,13	15,3	22,43
4	10	14,0	24,0
5	9,785	13	22,785
Wartość średnia			9,785 13 22,785

Badania składu chemicznego warstw aluminiowych modyfikowanych hafnem

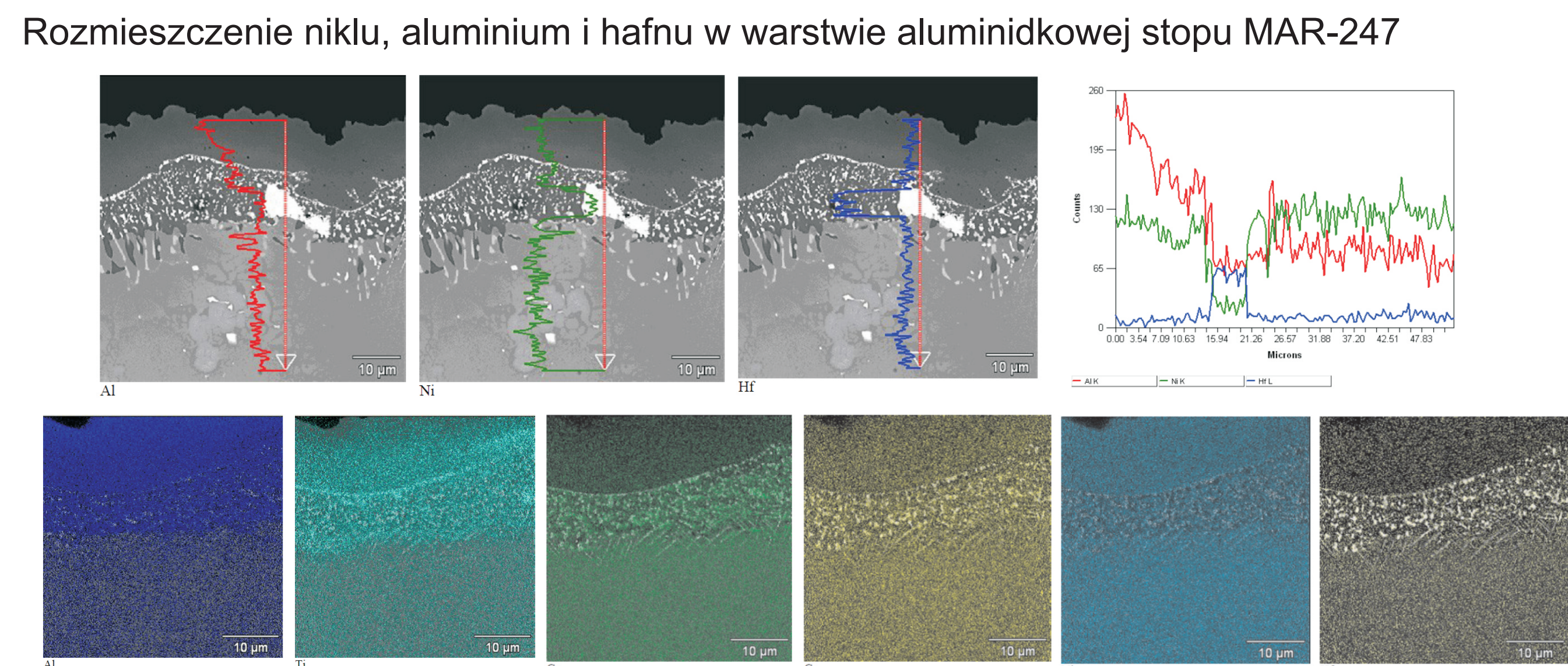
Próbki z nadstopów niklu Inconel 100, Inconel 713LC oraz MAR 247, na których metodą CVD wytworzona została warstwa aluminiowa poddana badaniom składu chemicznego, i obserwacjom mikroskopowym zgiętkom metalograficznym. Stosowano elektronowy mikroskop skaningowy HITACHI S-3400N z systemem do mikroanalizy składu chemicznego EDS. Obserwacje mikroskopowe przeprowadzono na zgiętkach poprzecznych przygotowanych metodami standardowymi według normy ASTM E3 przy użyciu urządzeń firmy Struers. Obserwacje mikrostruktury wykonano przy użyciu elektronowego mikroskopu skaningowego Hitachi S-3400N. Stosowano detektor SE elektronów wtórnych, napięcie przyspieszające 15 kV, rozmiar plamki (Spot Size) <10 m. Analizę składu chemicznego w mikroobszarach (zaznaczonych na zdjęciach) wykonano metodą spektroskopii dyspersji energii promieniowania rentgenowskiego przy użyciu elektronowego mikroskopu skaningowego Hitachi S-3400N z przystawką EDS (program NoranSystemSix). Stosowano detektor BSE elektronów wtórnych rozproszonych, napięcie przyspieszające 15 kV, rozmiar plamki (Spot Size) <10 m.



Mikrostruktura nadstopu Inconel 100 z warstwą aluminiową modyfikowaną hafnem w temp. 1020 °C i w czasie 3h przy ciśnieniu 150 hPa

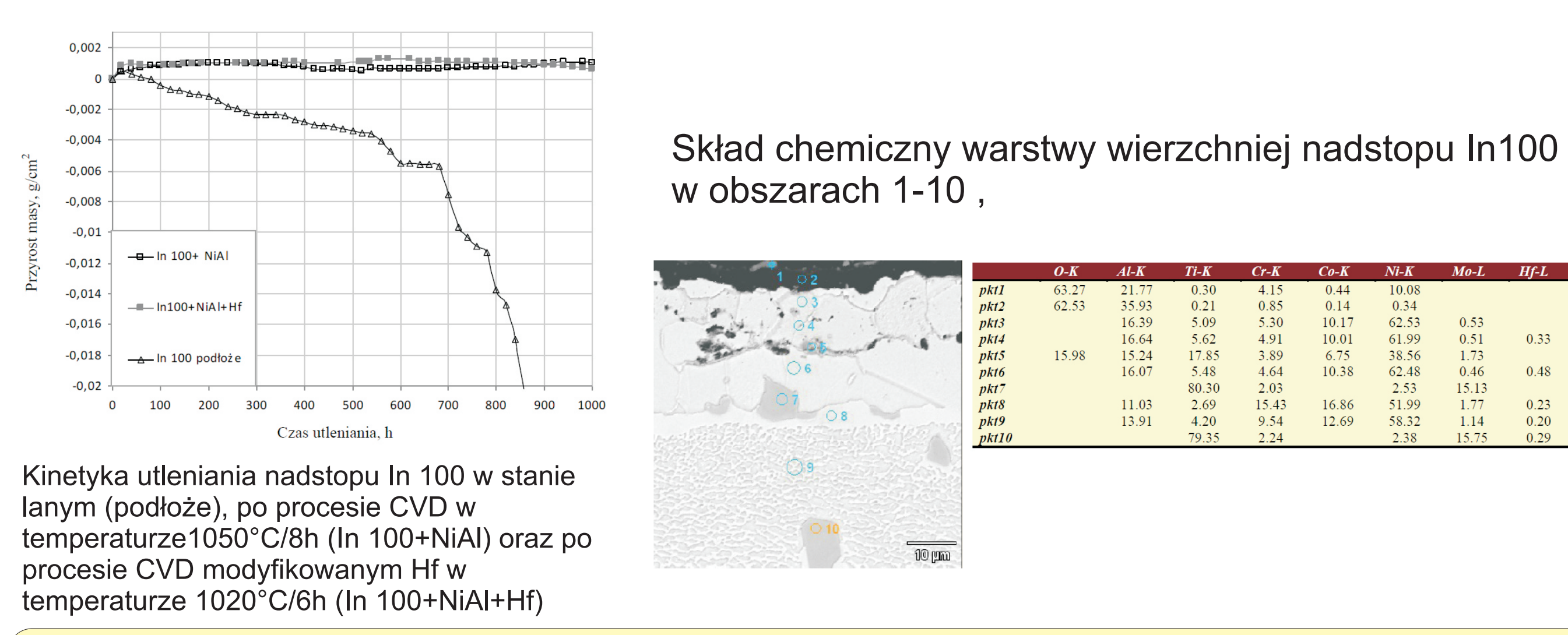
Wzrostki	Al	Ti	Cr	Ni	Mo	Hf
Inconel 100-Hf 2162j p1	11,59	6,26	0,75	8,49	12,48	58,31
Inconel 100-Hf 2162j p2	26,52	0,96	1,87	10,01	49,62	
Inconel 100-Hf 2162j p3	23,44	2,25	0,18	5,84	10,38	59,10
Inconel 100-Hf 2162j p4	18,31	8,22	5,85	12,29	52,49	2,02
Inconel 100-Hf 2162j p5	13,28	6,28	0,76	11,86	12,88	50,14
Inconel 100-Hf 2162j p6	67,28	3,10	1,72			25,82
Inconel 100-Hf 2162j p7	64,39	4,39				26,50
Inconel 100-Hf 2162j p8	5,48	5,85	0,96	8,06	14,09	63,43

Rozmieszczenie składników stopowych oraz pierwiastków formujących warstwę aluminiową na przekroju poprzecznym warstwy aluminiowej nadstopu Inconel 100 z modyfikowanej hafnem w temp. 1020 °C i w czasie 6h przy ciśnieniu 150 hPa



Rozmieszczenie składników stopowych oraz pierwiastków formujących warstwę aluminiową na przekroju poprzecznym warstwy aluminiowej nadstopu MAR-247 z modyfikowanej hafnem w temp. 1020 °C i w czasie 3h przy ciśnieniu 150 hPa

Odporność na cykliczne utlenianie nadstopów niklu po procesach aluminiowania metodą CVD. Proces utleniania prowadzono w warunkach cyklicznych zmian temperatury w atmosferze powietrza. Próbki wkładano do pieca nagrzanego do temperatury 1100C, wygrzewano izotermicznie w czasie 20h, następnie chłodzono w powietrzu do temperatury otoczenia i ważono z dokładnością 0,0001g. Prowadzono badania mikroskopowe na powierzchni i przekroju poprzecznym wytworzonej warstwy aluminiowej przed i po procesie utleniania. Analizę składu chemicznego w obszarach stref warstwy aluminiowej prowadzono przy pomocy mikroskopu skaningowego Hitachi S-3400N z przystawką EDS.



Wnioski

Warstwy aluminiowe otrzymane w procesach CVD na podłożu stopów niklu w procesach CVD wykazały obecność dwóch stref - zewnętrznej powstałej w efekcie osadzenia aluminium i odrzuconej dyfuzji niklu oraz wewnętrznej - dyfuzyjnej. Głębokość stref wynika z warunków procesu aluminiowania: czasu trwania zasadniczego etapu procesu CVD oraz ciśnienia reaktora. Analiza składu chemicznego w obrębie warstwy aluminiowej wykazała występowanie pierwiastków wchodzących w skład stopu - materiału podłoża. Ponadto stwierdzono fluktuację zawartości niklu oraz wzrost zawartości aluminium w warstwie wewnętrznej. Strefa zewnętrzna warstwy aluminiowej zbudowana jest z fazy NiAl, w strefie dyfuzyjnej (wewnętrznej) występują ponadto wydzielone fazy wzbogaconych w pierwiastki węglotworcze oraz hafn. Największą zawartość hafnu stwierdzono w strefie wewnętrznej (1,8-2,08% mas.). Badania kinetyki utleniania w temperaturze 1100C wskazują, że zastosowanie procesu aluminiowania metodą CVD poprawia odporność na utlenianie. Obserwowano mały przyrost masy próbek z warstwą NiAl, ok. 0,001g/cm². Uszlachetnienie warstwy aluminiowej hafnem nie wpłynęło na poprawę żaroodporności warstwy aluminiowej. Podobny przyrost masy obserwowano dla nadstopu po procesie aluminiowania modyfikowanym Hf.

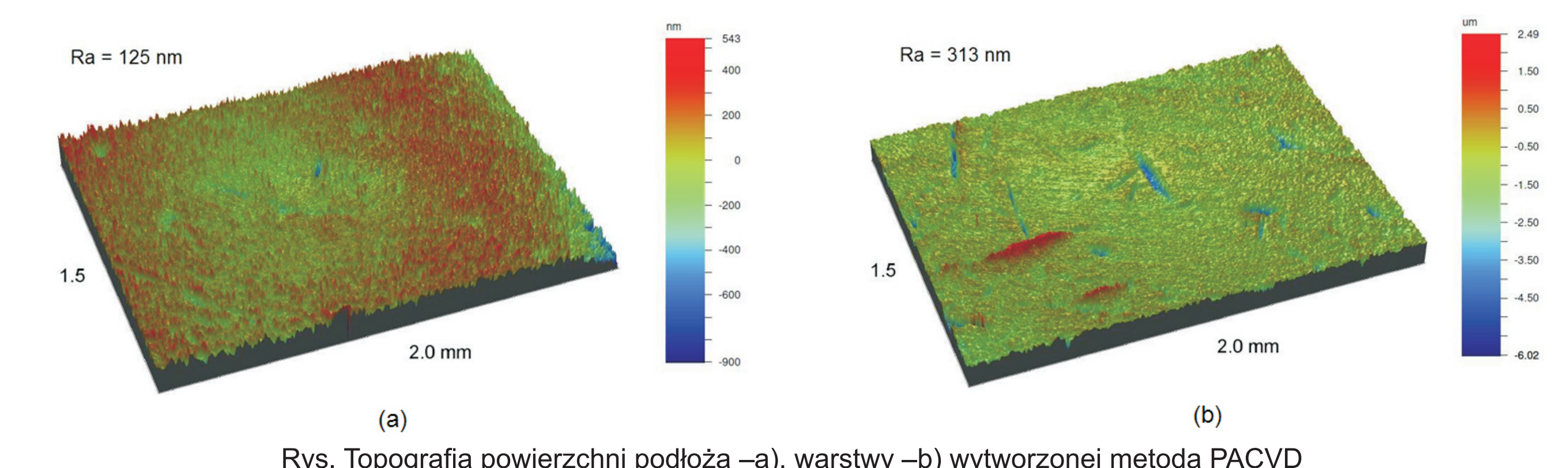
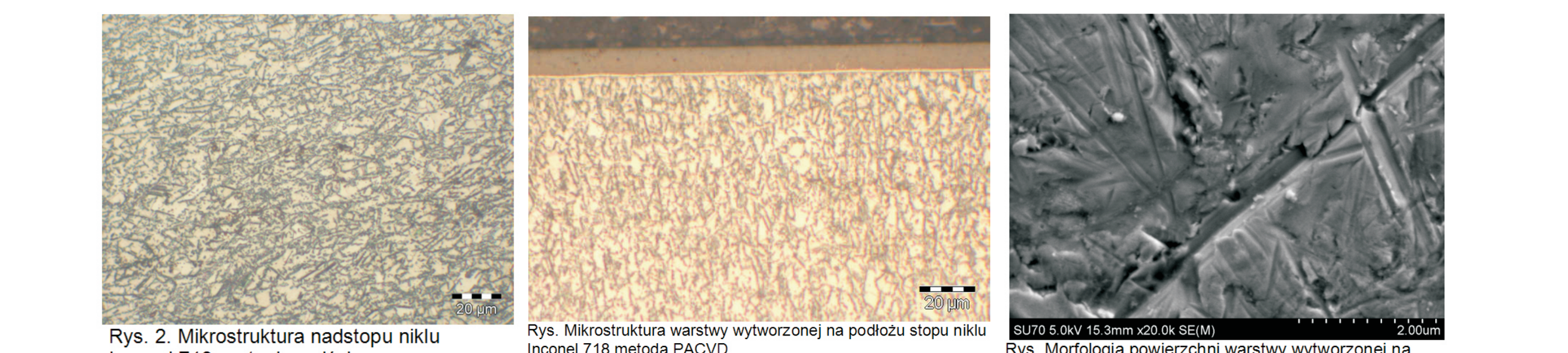
Wyniki badań

Opracowanie podstaw technologii zwiększania odporności na korozję wysokotemperaturową oraz zużycie przez tarcie stopów niklu o zawartości 18% Cr

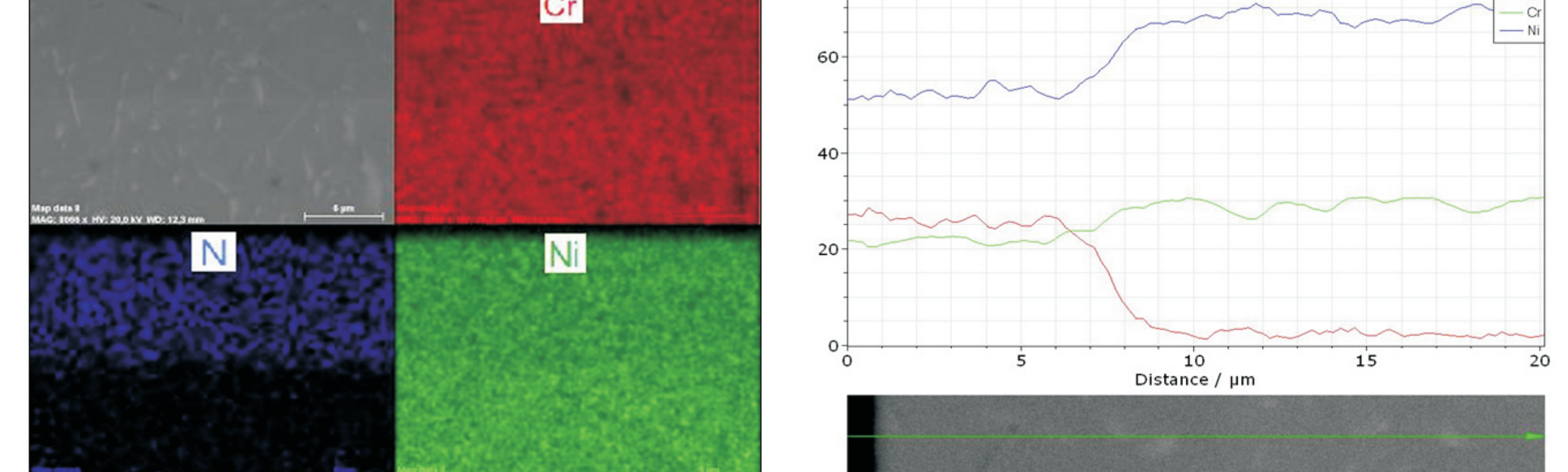
Zakres pracy obejmował:
 • wytworzenie dyfuzyjnej warstwy zawierającej azotek chromu na podłożu nadstopu niklu Inconel 718 metodą PACVD
 • określenie składu fazowego warstw (Bruker D8);
 • określenie mikrostruktury warstw (Nikon Neophot 200);
 • określenie składu chemicznego EDS (HITACHI 3500, SU 70);
 • badania topografii powierzchni (profilometr skaningowy firmy VEECO);
 • badania odporności korozyjnej (AutoLab PGSTAT 100);
 • badania przyczepności warstw do podłoża (mikro-combi-tester MCT).

Tabela 1: Skład chemiczny badanego stopu Inconel 718

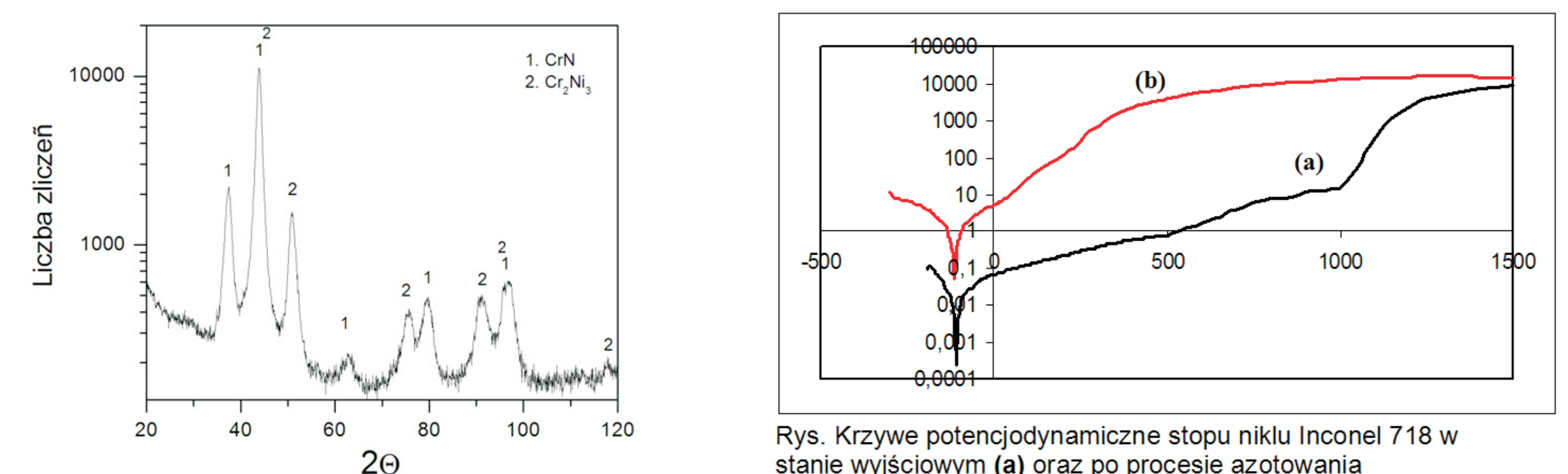
Pierwiastek	Cr	Al	Ti	Nb	Mo	Fe	Co	Ni
% mas	18,9	0,47	1,1	5,2	3,0	17,1	0,2	reszta
% at	21,1	1,0	1,4	3,2	1,8	17,8	0,2	



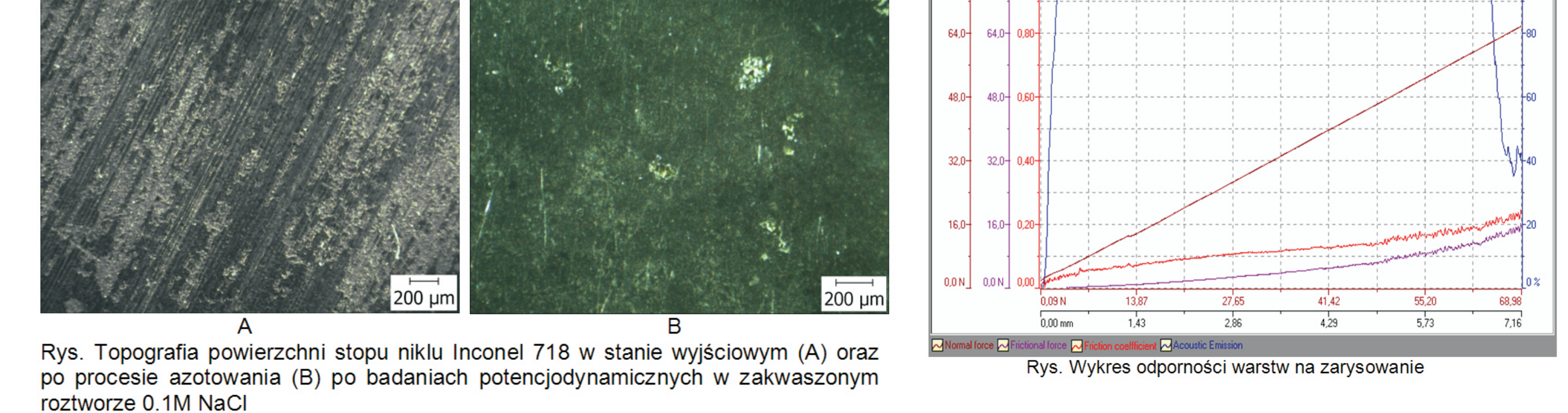
Rys. Topografia powierzchni podłoża (a), warstwy (b) wytworzonej metodą PACVD



Rys. Rozkład powierzchniowy pierwiastków na przekroju poprzecznym warstwy



Rys. Widmo XRD z powierzchni warstwy wytworzonej metodą PACVD na podłożu stopu niklu Inconel 718



Rys. Topografia powierzchni stopu niklu Inconel 718 w stanie wyjściowym (A) oraz po procesie azotowania (B) po badaniach potencjodynamicznych w zakwaszonym roztworze 0,1M NaCl

Wnioski

- W wyniku azotowania nadstopu niklu Inconel 718 w temperaturze 560C możliwe jest wytworzenie warstwy typu: CrN+ Cr₂N₃ o grubości ok. 10 m.
- Wytworzona warstwa charakteryzuje się wysoką twardością ok. 1000HV_{0,05} w porównaniu z materiałem podłoża ok. 300HV_{0,05}, pogarsza jednak odporność korozyjną stopu niklu Inconel 718

Przykłady zastosowania w lotnictwie

Przedstawiony program badań ukierunkowany jest na rozwój technologii produkcji:
 • dysków turbin gazowych,
 • komór spalania,
 • pomp,
 • śrub do pracy w wysokich temperaturach,
 • obudowy,
 • turbin gazowych - z zastosowaniem m.in. stopu niklu Inconel

Wady ograniczające szersze zastosowanie stopu niklu Inconel 718

- segregacja niobu w podwyższonej temperaturze;
- podatność na korozję szczelinową w środowiskach wodnych zawierających jony chlorkowe Cl⁻ w temperaturze otoczenia;
- mała twardość (ok. 350HV_{0,05}).

Wskaźniki realizacji celów projektu

Referaty
 • *The analysis of processes of degradation thermal barrier coatings in conditions of exploitation*. DSL2010 5 - 7 lipca 2010, Paryż, Francja
 • *The influence of quantity and the distribution of cooling channels of turbine blades on level of stresses in the protective layer TBC and the efficiency of cooling*. IWCMM20 8 - 10 września 2010, Loughborough, Wielka Brytania.
 • *Mechanizm uszkodzenia ciepłych powłok ceramicznych TBC wywołany szokiem termicznym w łopatkach turbin silników odrzutowych z chłodzeniem wewnętrznym*. Zagadnienia mechaniki pękania i skrawania materiałów 21-23 października 2010.
 • Yaworska M, Sieniawski J., Filip R., Krupa K.: *Charakterystyka warstw aluminiowych wytworzonych metodami CVD na nadstopach niklu Inconel 625 oraz Inconel 713LC*. IV Konferencja Naukowa „Nowoczesne technologie w inżynierii powierzchni” Spała 27-30 wrzesień 2010

Publikacje
 • Yaworska M, Sieniawski J., Filip R., Krupa K.: *Charakterystyka warstw aluminiowych wytworzonych metodami CVD na nadstopach niklu Inconel 625 oraz Inconel 713LC*. Inżynieria Materiałowa 4(176) 2010 str 1287-1290