

Nowoczesne pokrycia barierowe na krytyczne części silnika

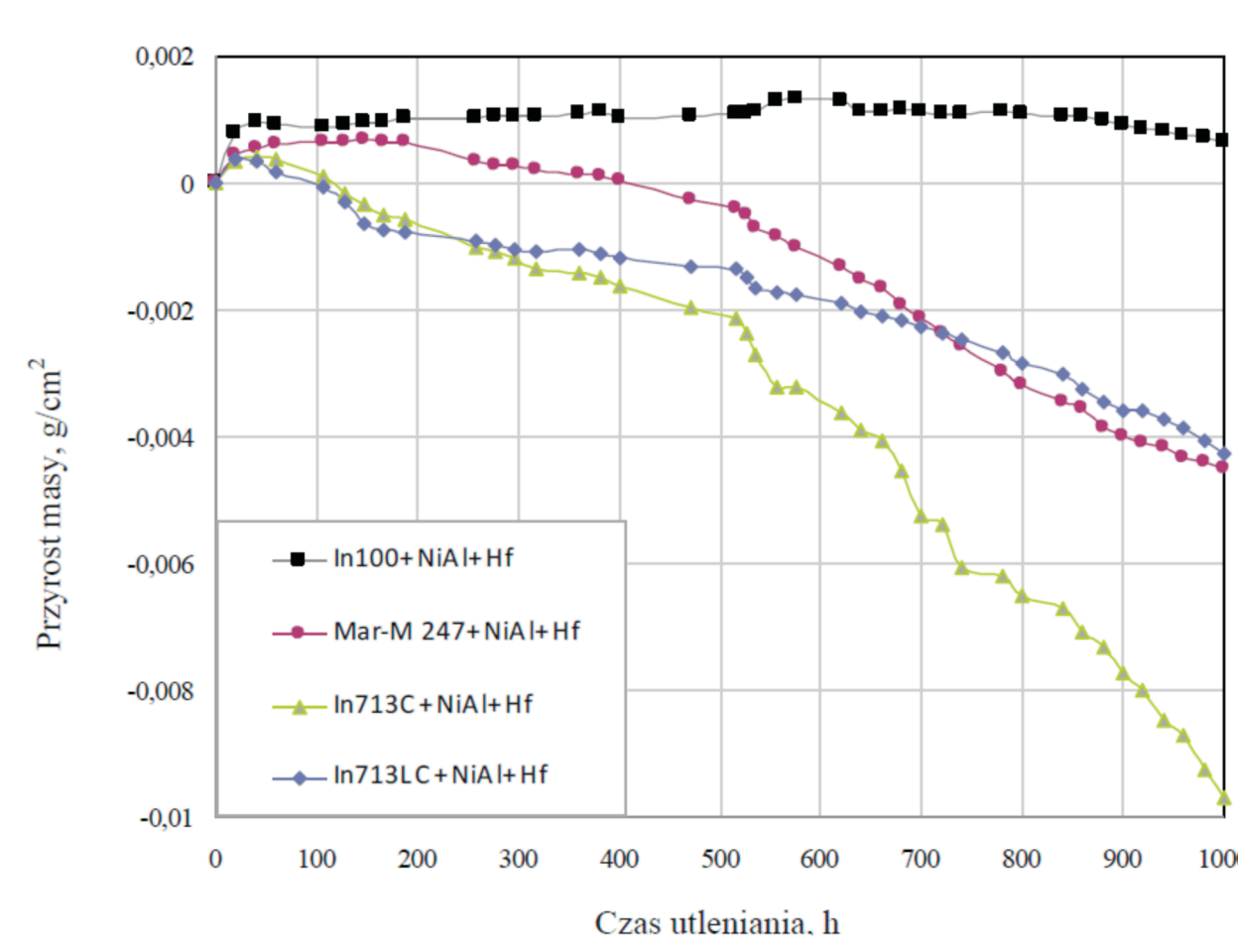
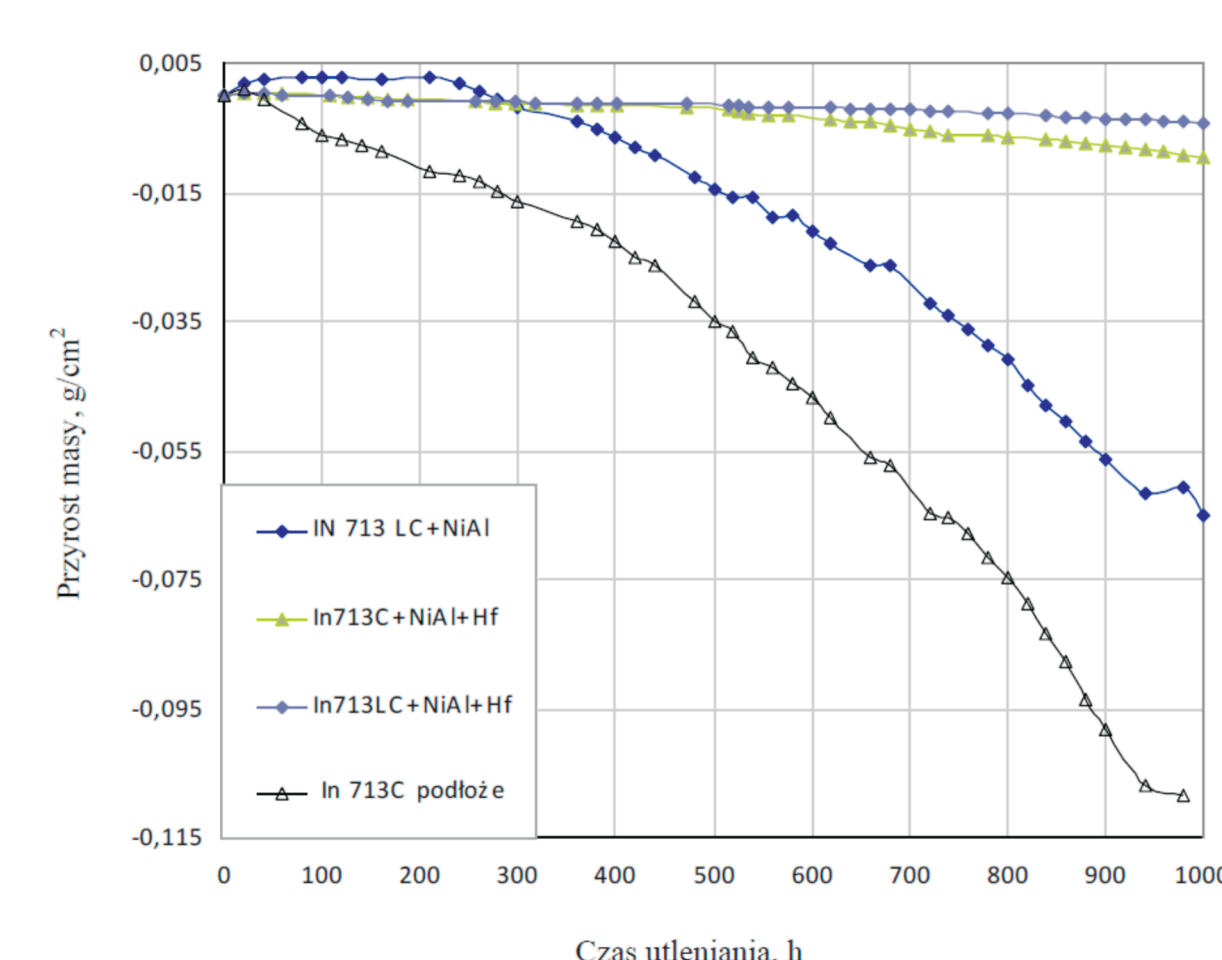
Politechnika Śląska, Politechnika Warszawska, Politechnika Rzeszowska, Politechnika Lubelska, Uniwersytet Rzeszowski

Wyniki badań

Badania odporności na korozję wysokotemperaturową warstw aluminiowych wytworzonych w procesie standardowym i modyfikowanych hafnem

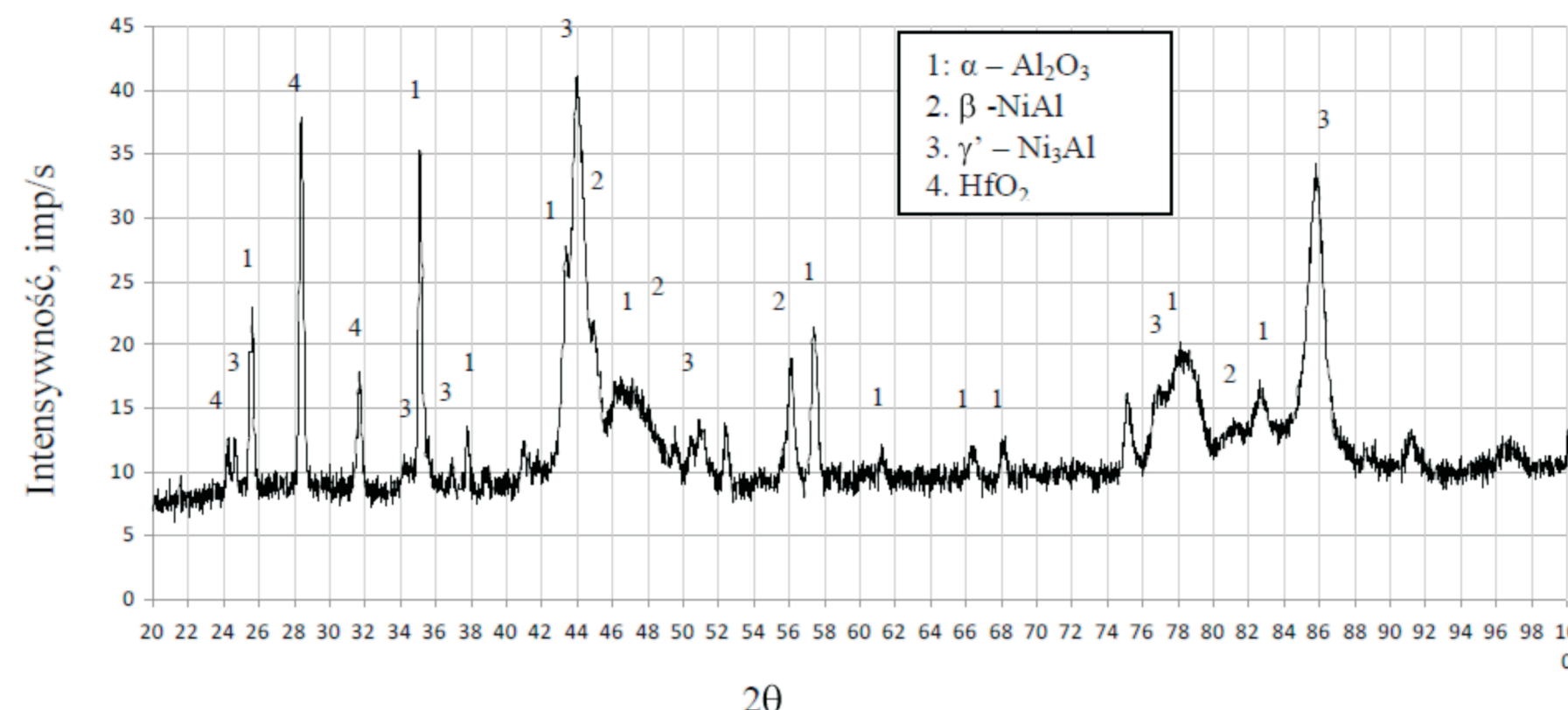
Bariery cieplne pozwalają na obniżenie temperatury elementów gorących silnika o ok. 150°C. Zewnętrzna warstwa ceramiczna nie chroni materiału podłoża przed korozją gazową. W żarostojalnych stopach niklu stosuje się warstwę pośrednią - pokrycia aluminiowe wytwarzane metodą CVD. Parametry eksploatacyjne międzywarstwy typu Ni/Al, której wytwarzanie prowadzono w procesie zapewniającym modyfikację składu chemicznego za pomocą hafnu decydują o właściwościach użytkowych bariery cieplnej.

Proces utleniania prowadzono w warunkach cyklicznych zmian temperatury w atmosferze powietrza. Próbkę wkładano do pieca nagrzanego do temperatury 1100°C, 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. Głębokość warstwy aluminiowej określono przy użyciu mikroskopu świetlnego Nikon Epiphot 300 wyposażonego w oprogramowanie do cyfrowej analizy obrazu NIS-Elements. Skład fazowy warstwy aluminiowej przed i po procesie utleniania określono metodą rentgenowskiej analizy fazowej przy użyciu dyfraktometru rentgenowskiego ARL X'TRA. Identyfikację składników fazowych wykonano metodą porównawczą z wykorzystaniem bazy danych PDF.



Kinetyka utleniania nadstopów In 713C i In 713C+NiAl w stanie lanym (podłoże), po procesie CVD w temperaturze 1050°C/8h (In 713C+NiAl) oraz po procesie CVD modyfikowanym Hf w temperaturze 1020°C/6h (In 713C+NiAl+Hf, In 713C+NiAl+Hf)

Kinetyka utleniania nadstopów niklu w temperaturze 1100°C/1000h po procesie CVD modyfikowanym Hf w temperaturze 1020°C/6h



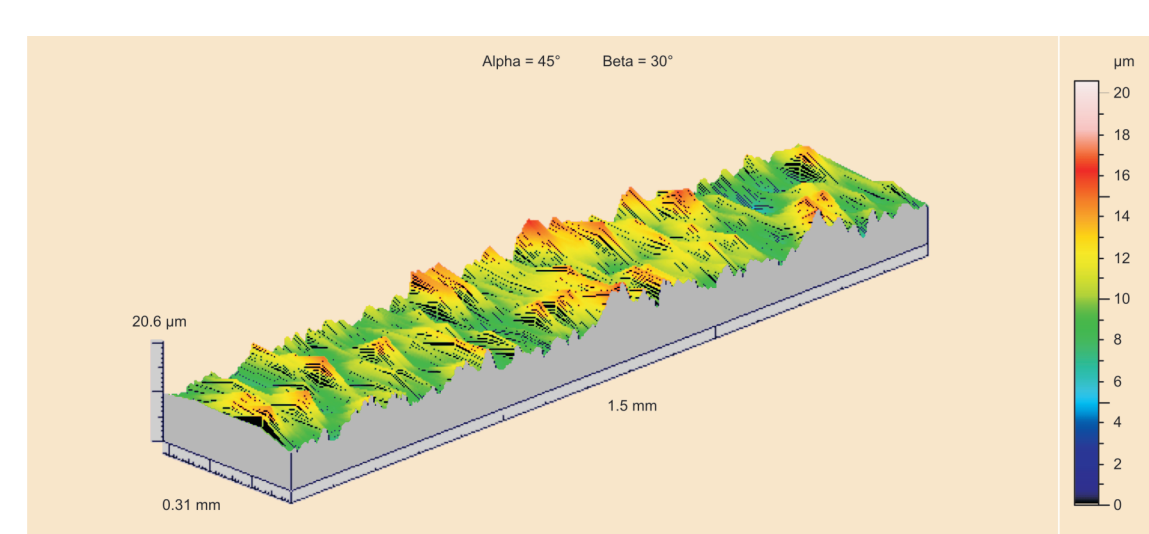
Dyfraktogram aluminiowej warstwy modyfikowanej Hf wytworzonej na podłożu z nadstopu MAR-M 247 po procesie utleniania

Ocena parametrów topograficznych powierzchni próbek poddanych badaniom odporności na korozję wysokotemperaturową.

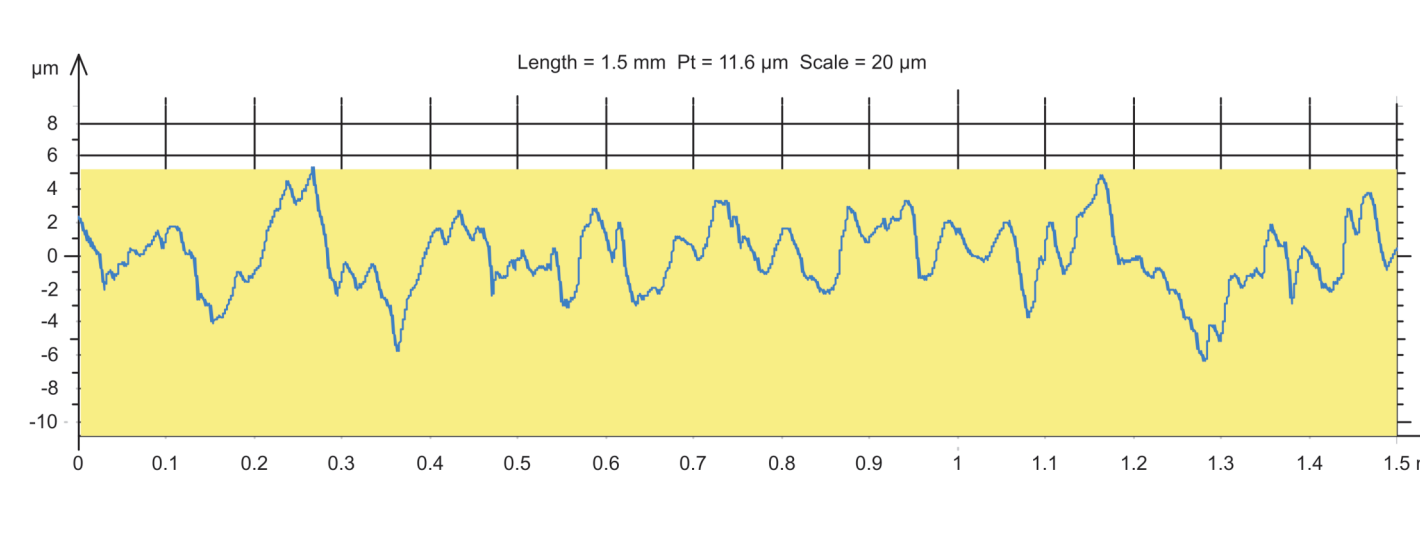
Parametry topografii powierzchni warstwy aluminiowej po procesie utleniania określono stosując skaner 3D firmy Hommelwerke wyposażony w głowicę pomiarową T 8000, przy prędkości skanowania 10,5 µm/s i kroku skanowania 8 µm. Analizę stanu powierzchni warstwy przetopionej prowadzono uwzględniając następujące parametry:

- średnie arytmetyczne odchylenie chropowatości powierzchni – Sa, µm
- średnie kwadratowe odchylenie chropowatości powierzchni – Sq, µm
- maksymalna wysokość wzniesienia powierzchni – Sp, µm
- maksymalna głębokość wgłębienia powierzchni – Sv, µm
- wysokość nierówności powierzchni – St, µm
- współczynnik skośności powierzchni – Ssk, -
- współczynnik skupienia – Kurtosis – Sku, -
- dziesięciopunktowa wysokość nierówności powierzchni – Sz, µm.

Przeprowadzono również analizę nośności dla powierzchni współpracujących w parze tribologicznej a także widmową analizę rozkładu przedziałów nierówności powierzchni.



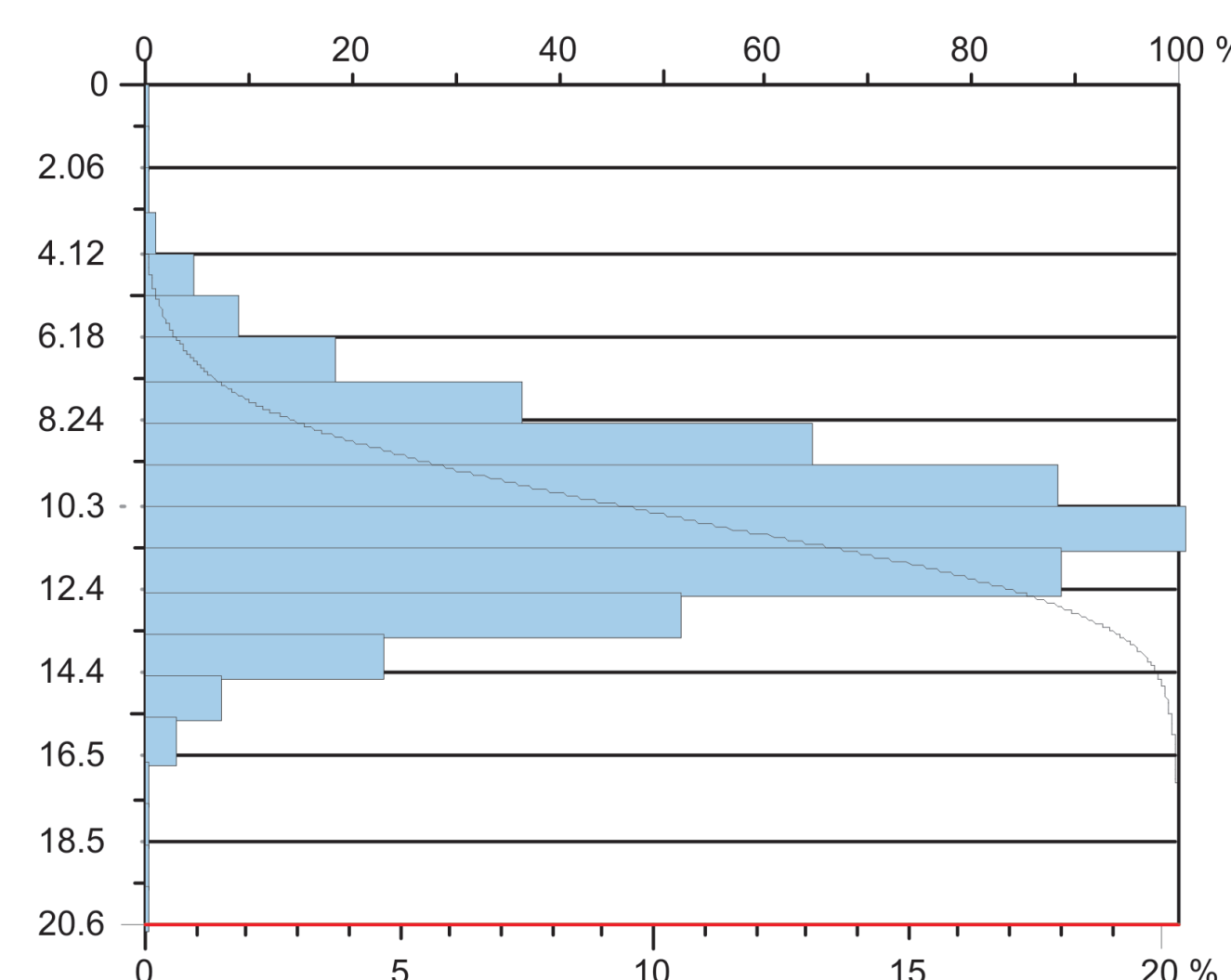
Topografia powierzchni warstwy aluminiowej modyfikowanej Hf po procesie utleniania w temperaturze 1100°C/1000h na podłożu In 100



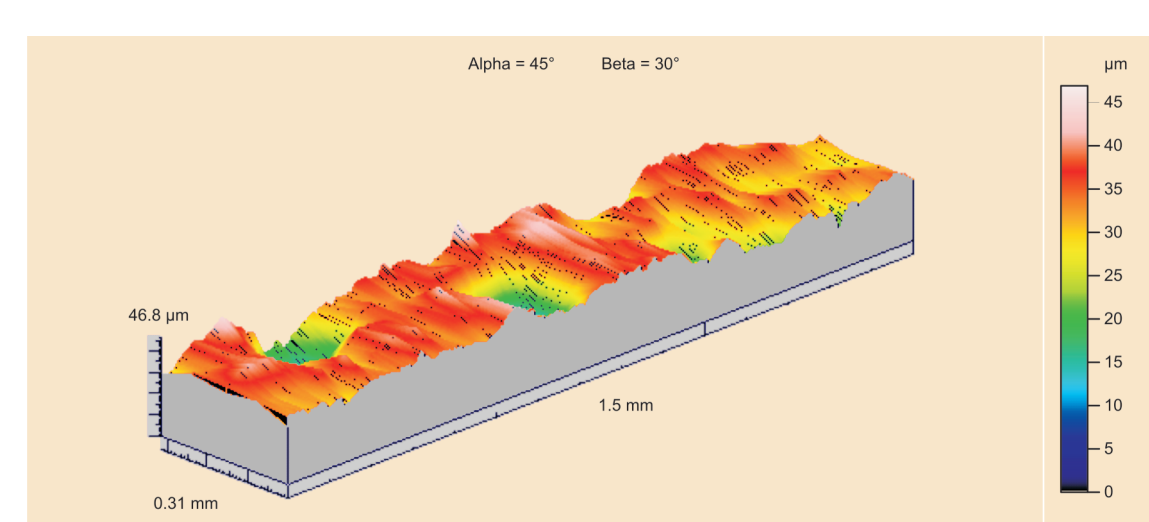
Profil chropowatości powierzchni warstwy aluminiowej modyfikowanej Hf po procesie utleniania w temperaturze 1100°C/1000h na podłożu In 100

Amplitude Parameters

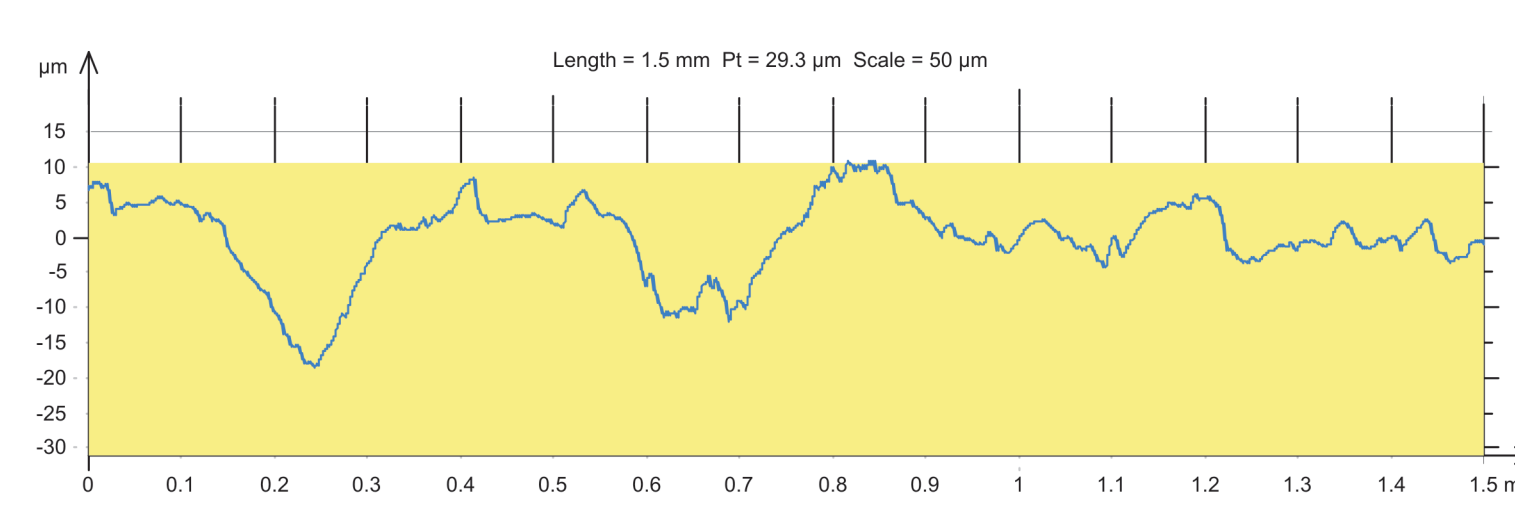
Sa = 1,64 µm
Sq = 2,09 µm
Sp = 10,5 µm
Sv = 10,1 µm
St = 20,6 µm
Ssk = 0,309
Sku = 3,57
Sz = 14,9 µm



Parametry topografii powierzchni, rozkład rzędnych i funkcja nośności powierzchni warstwy aluminiowej modyfikowanej Hf po procesie utleniania w temperaturze 1100°C/1000h na podłożu In 100



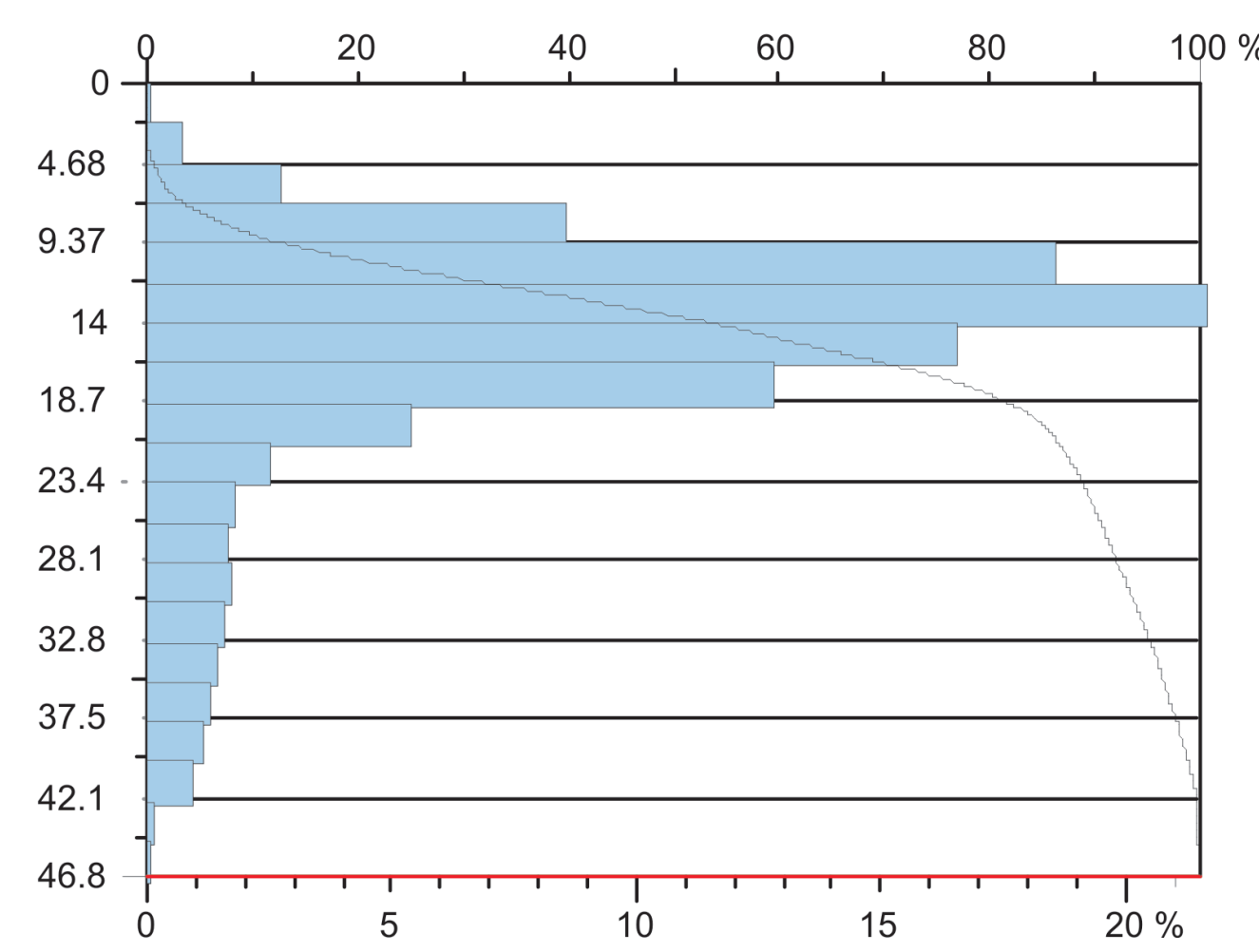
Topografia powierzchni stopu In 100 po procesie utleniania w temperaturze 1100°C/1000h



Profil chropowatości powierzchni stopu In 100 po procesie utleniania w temperaturze 1100°C/1000h

Amplitude Parameters

Sa = 5 µm
Sq = 7,1 µm
Sp = 15,5 µm
Sv = 31,3 µm
St = 46,8 µm
Ssk = -1,66
Sku = 5,96
Sz = 42,2 µm



Parametry topografii powierzchni, rozkład rzędnych i funkcja nośności powierzchni stopu In 100 po procesie utleniania w temperaturze 1100°C/1000h

Wnioski

Proces utleniania prowadzony w temperaturze 1100°C w czasie 1000h wykazał wzrost odporności na korozję gazową stopów niklu z wytworzoną warstwą aluminiową w porównaniu z materiałem podłoża.

Zastosowanie procesu CVD połączonego z modyfikacją warstwy aluminiowej hafnem skutkowało wzrostem trwałości w warunkach korozji gazowej w porównaniu z konwencjonalnym procesem aluminiowania. Najlepsze właściwości wykazywał stop Inconel 100.

Analiza składu chemicznego warstwy aluminiowej po procesie utleniania wykazała największą zawartość aluminium w zewnętrznej strefie warstwy oraz zmniejszenie jego zawartości w wewnętrznych strefach warstwy. Ponadto stwierdzono obecność tlenu jako efektu procesu korozji w atmosferze powietrza. Jednocześnie w warstwie przypowierzchniowej nastąpił wzrost stężenia Cr i Ti.

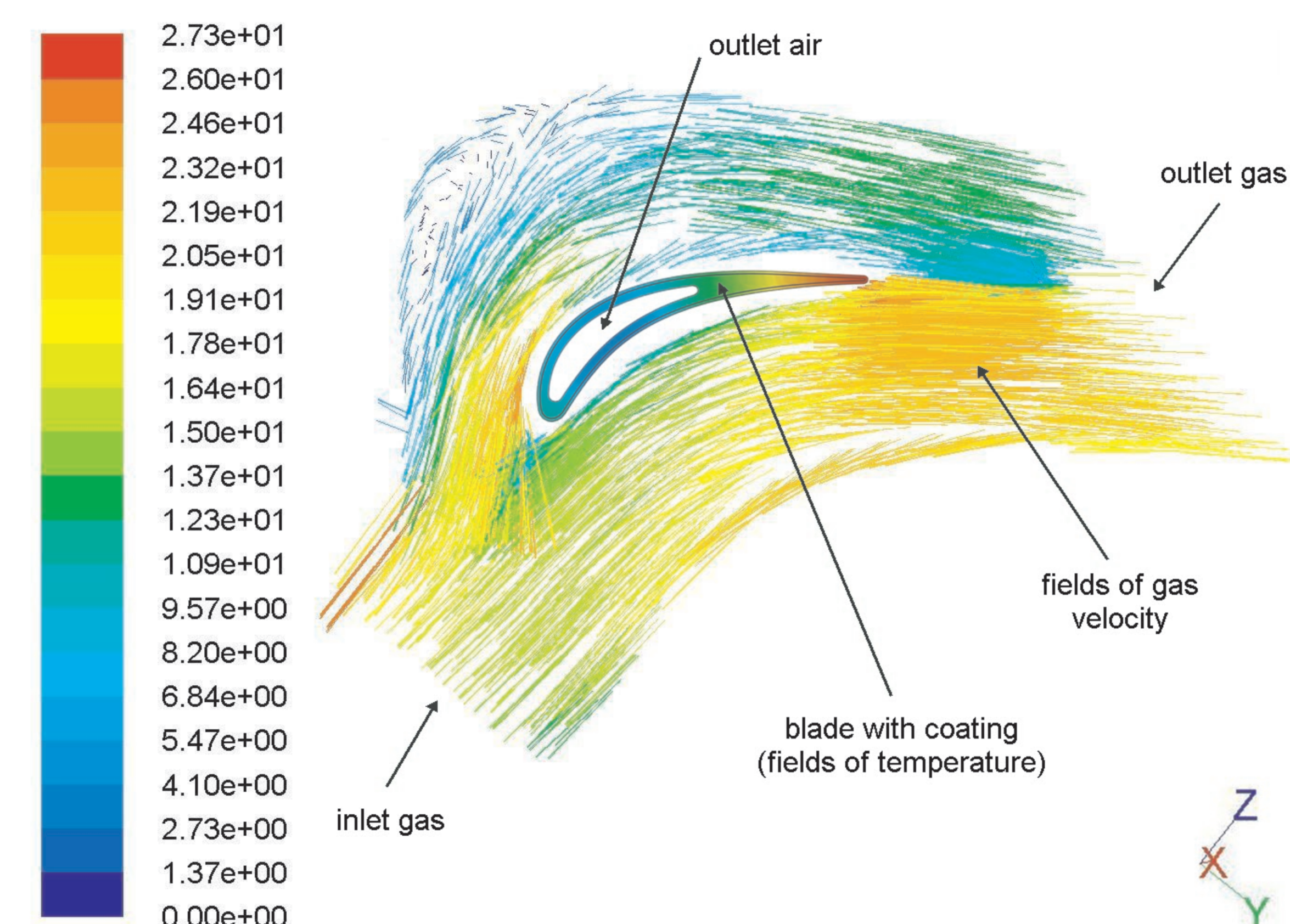
Badania składu fazowego powierzchni po testach korozyjnych ujawniły obecność fazy tlenkowej Al₂O₃ oraz NiAl, Ni₃Al. W warstwie aluminiowej modyfikowanej Hf występowała również faza HfO₂.

Badania topografii powierzchni wykazały znaczny wzrost parametrów chropowatości w skutek procesów utleniania. Największą wartość parametrów stwierdzono po utlenieniu powierzchni bez warstwy aluminiowej co wiązało się ze znaczną intensywnością procesów korozyjnych (największy ubytek masy).

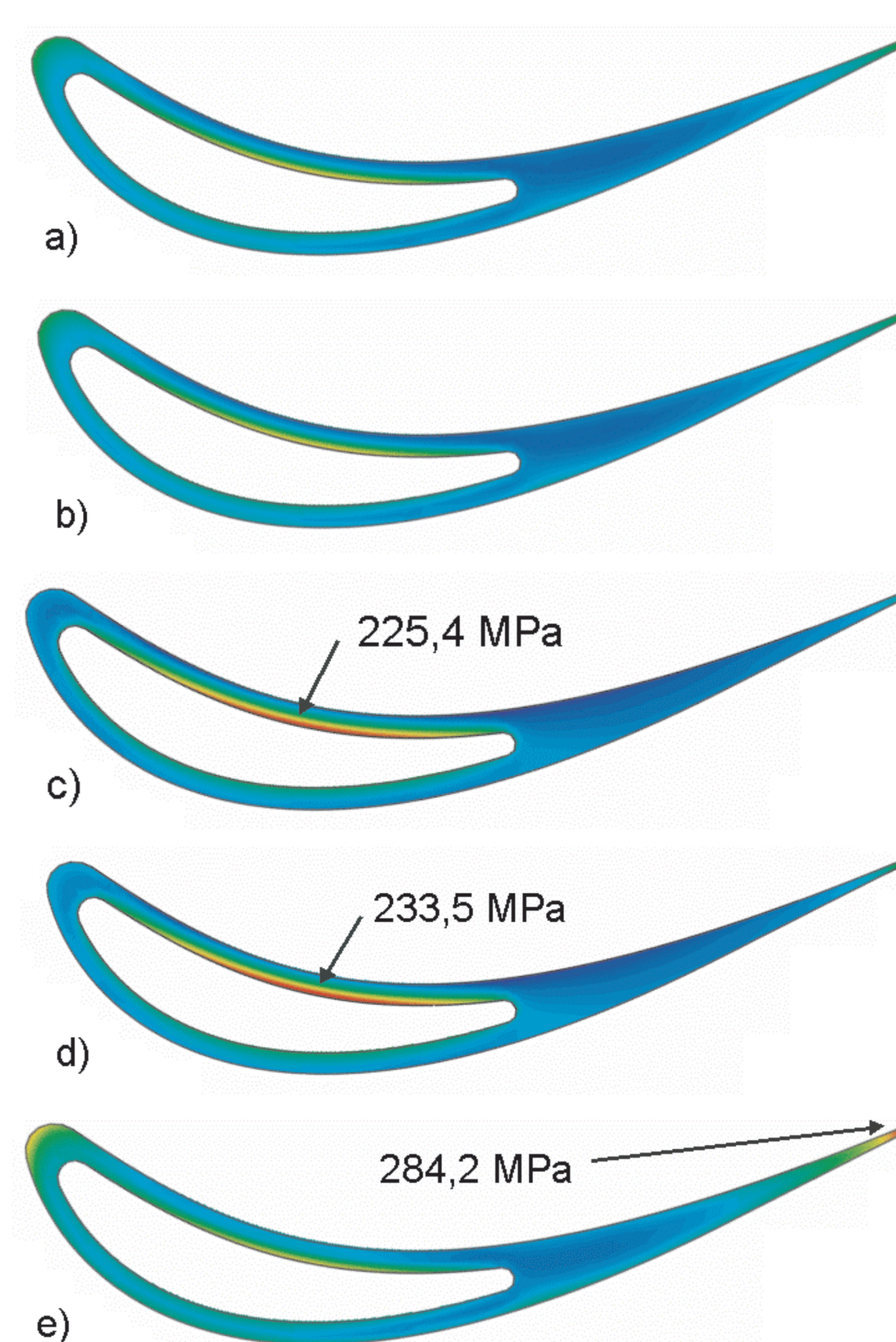
Wyniki badań

Przy projektowaniu i wytwarzaniu warstw ochronnych zabezpieczających najbardziej wyężone elementy turbiny przed oddziaływaniem gazów spalinowych o wysokiej temperaturze, powstaje problem właściwego doboru ich cech materiałowych takich jak: moduł sprężystości podłużnej, granica plastyczności, przewodność cieplna czy współczynnik rozszerzalności cieplnej. Poniższe badania miały na celu analizę wpływu zastosowania różnych powłok ochronnych na rozkłady temperatur wewnętrznej łopatki roboczej silnika oraz poziomy naprężeń. Rozważana łopatka posiadała wewnętrzny kanał chłodzący. Przeprowadzono łączenie pięć symulacji biorąc pod uwagę następujące materiały jako warstwa TBC: YSZ, B₂C, Al₂O₃ oraz MgZrO₃. Każda warstwa posiadała grubość 0,3mm.

Badania prowadzone były dwuetapowo. Pierwszy etap dotyczył symulacji przepływowej CFD, gdzie otrzymano niejednorodne pola temperatur w całej objętości łopatki, natomiast drugi etap badań związany był z nagłym chłodzeniem począwszy od stanu uzyskanego w symulacji CFD, gdzie analizie zostały poddane m.in. poziomy naprężenia powstałe w wyniku szoku termicznego.



Rys.1



Rys.2

Wnioski

Najkorzystniejszym materiałem pod względem poziomu naprężeń okazał się materiał MgZrO₃ (rys. a) dla którego wartość wynosiła 195,4 MPa. Nieco wyższe naprężenia – 198,2 MPa odnotowano dla łopatki z powłoką YSZ (rys. 2b). Odmienna sytuacja występuje dla powłoki YSZ (rys. 2c) oraz B₂C (rys. 2d). Pola nie są już jednorodne. Koncentracje naprężeń występują w obu przypadkach w połowie długości wewnętrznej krawędzi otworu od strony roboczej łopatki czyli tym samym dla przypadku występowania największych gradientów temperatur. Wartości maksymalnych naprężeń i miejsce ich występowania pokazano na rysunkach c i d.

Najbardziej niekorzystnym przypadkiem jest brak ochrony łopatki przez agresywnym środowiskiem. Na rysunku e pokazano miejsce największych koncentracji naprężeń występujących w części ogonowej. Maksymalna wartość stanowi około 145% w odniesieniu dla powłoki YSZ i MgZrO₃.

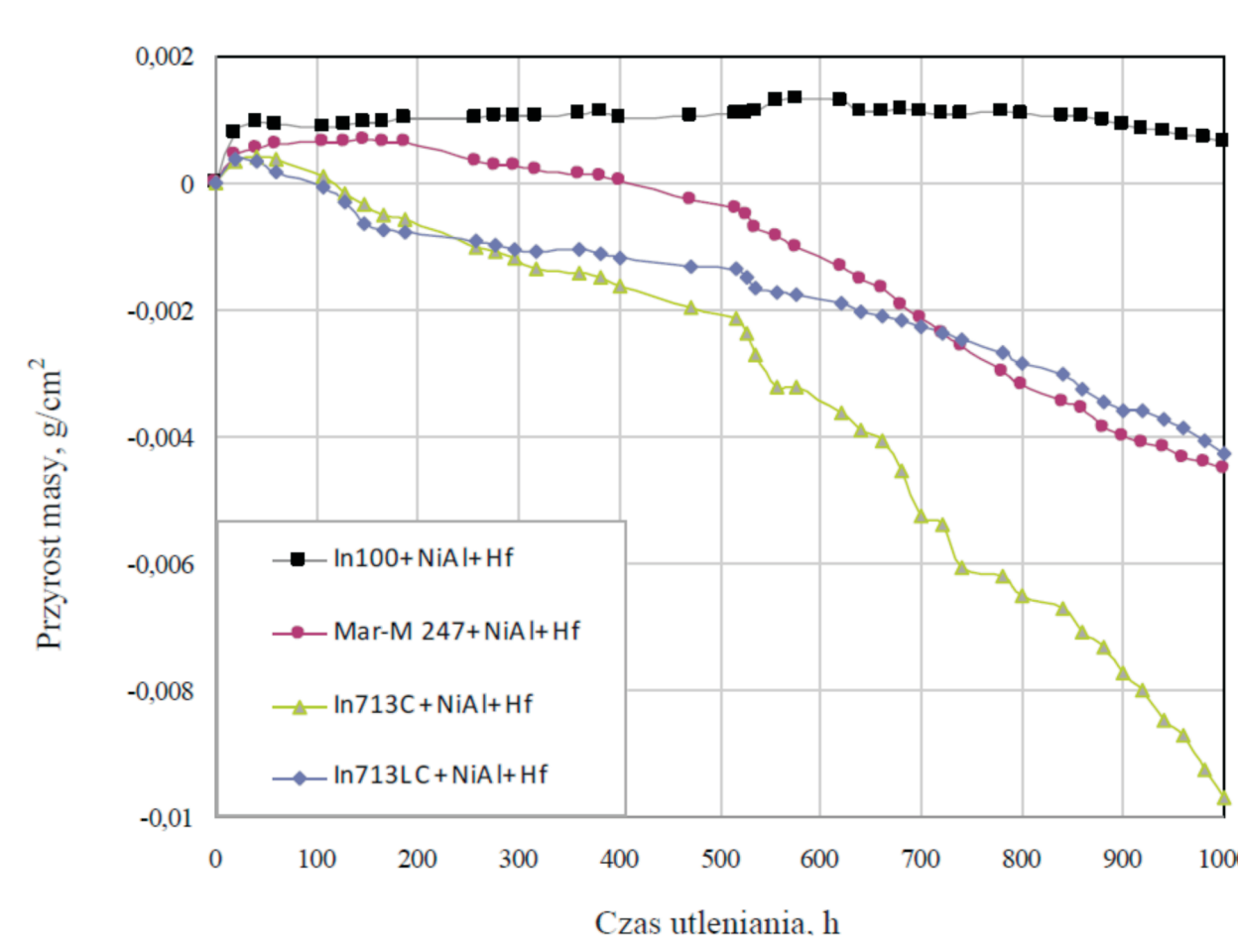
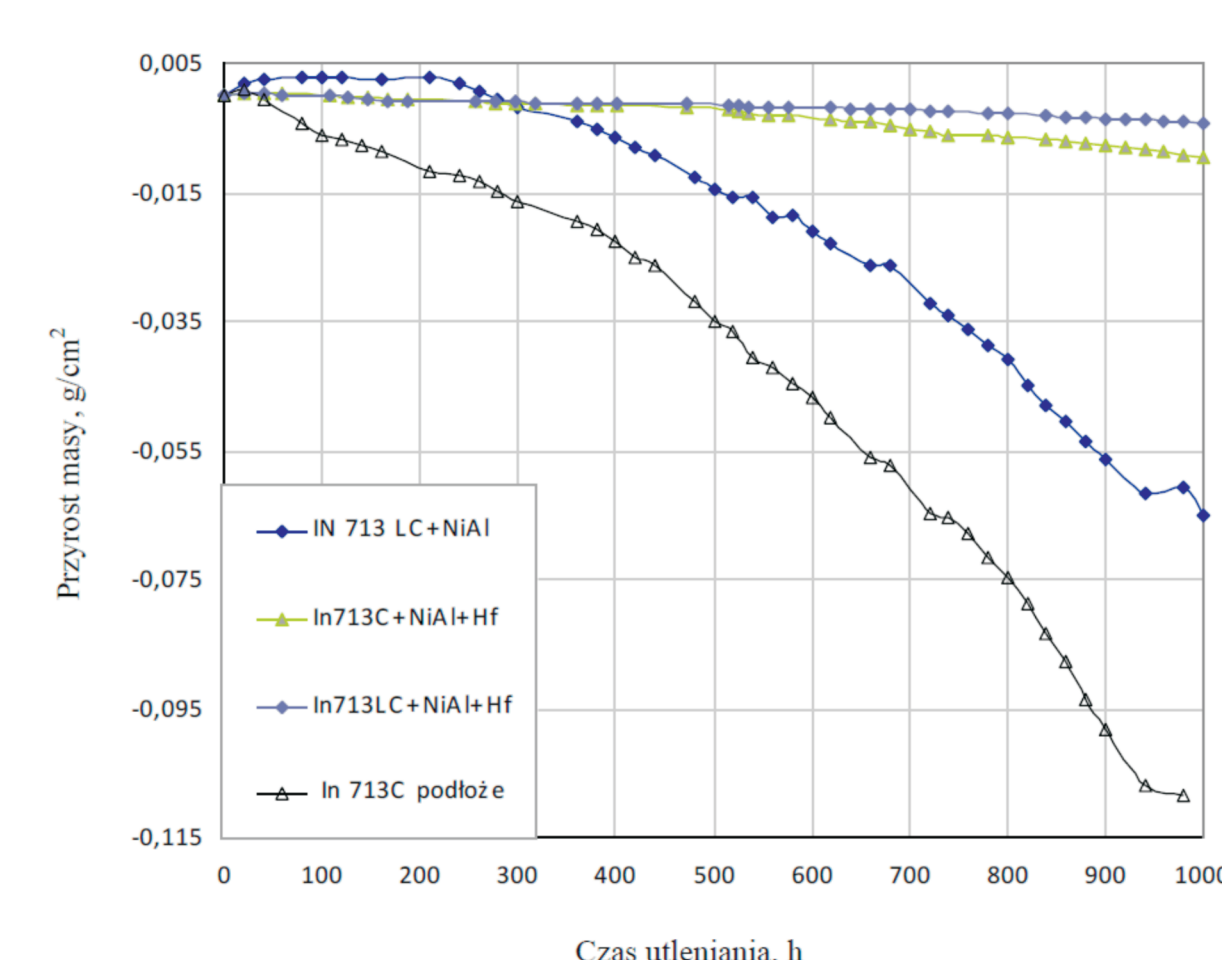
Wskaźniki realizacji celów projektu

Referaty

1. „The analysis of processes of degradation thermal barrier coatings in conditions of exploitation” Konferencja DSL2011 26 - 30 czerwca 2011, Algarve, Portugalia.
2. “Detection and numerical analysis of the most eforted places in turbine blades under real working conditions” IWCM21 22 - 24 sierpnia 2011, Limerick, Irlandia.

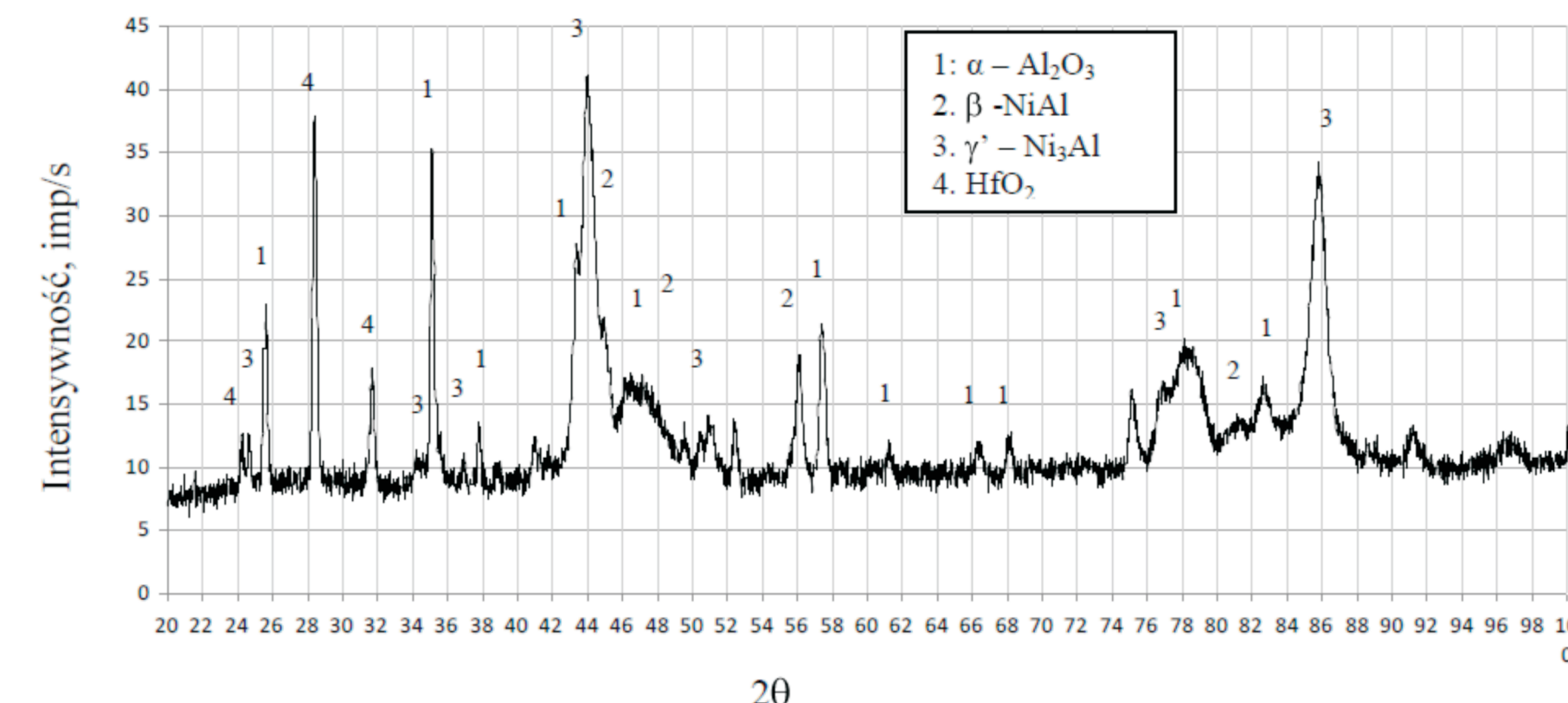
Publikacje

1. M.Yavorska, J.Sieniawski, M.Zielińska *Functional properties of alumide layer deposited on Inconel 713 LCNi-based superalloy in the CVD process*. Archives of Metallurgy and Materials 1 (56) 2011, 187-192



Kinetyka utleniania nadstopów In 713C i In 713C+NiAl w stanie lanym (podłoże), po procesie CVD w temperaturze 1050°C/8h (In 713C+NiAl) oraz po procesie CVD modyfikowanym Hf w temperaturze 1020°C/6h (In 713C+NiAl+Hf, In 713C+NiAl+Hf)

Kinetyka utleniania nadstopów niklu w temperaturze 1100°C/1000h po procesie CVD modyfikowanym Hf w temperaturze 1020°C/6h



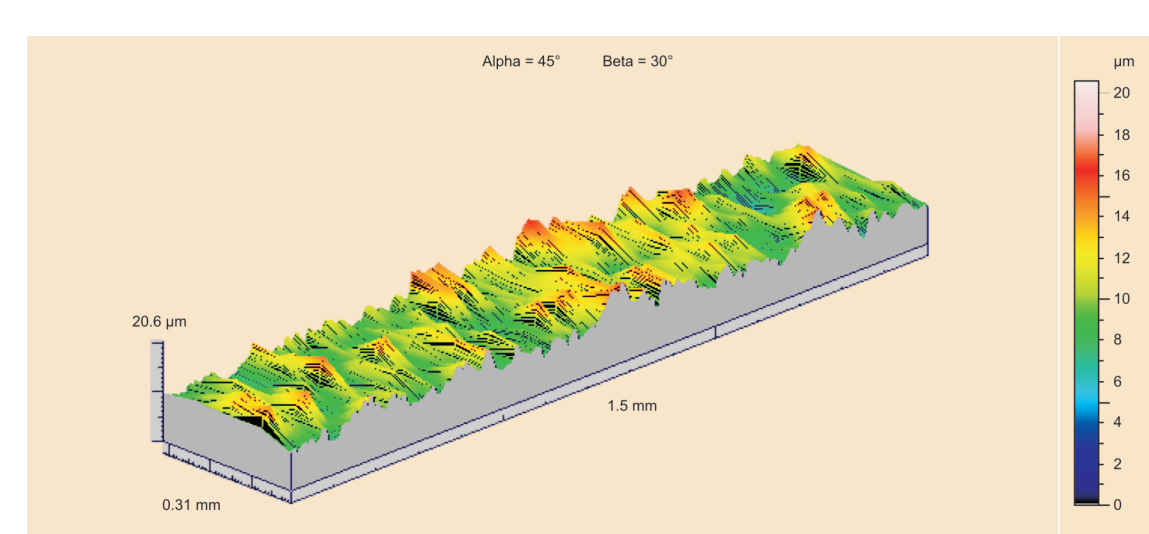
Dyfraktogram aluminiowej warstwy modyfikowanej Hf wytworzonej na podłożu z nadstopu MAR-M 247 po procesie utleniania

Ocena parametrów topograficznych powierzchni próbek poddanych badaniom odporności na korozję wysokotemperaturową.

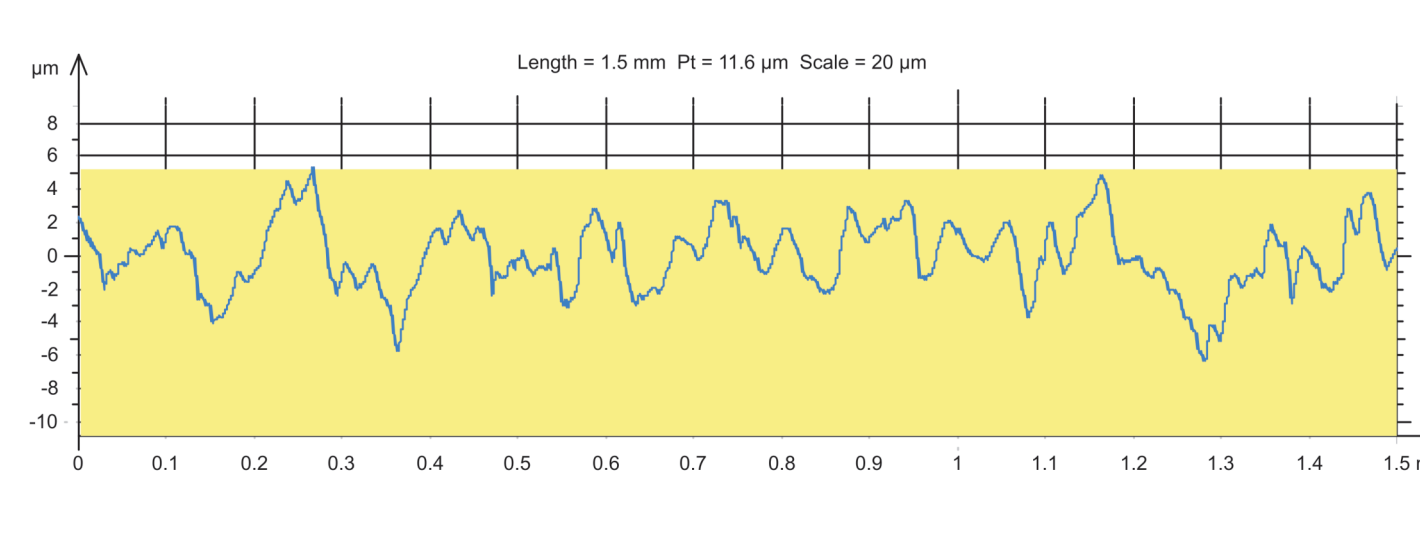
Parametry topografii powierzchni warstwy aluminiowej po procesie utleniania określono stosując skaner 3D firmy Hommelwerke wyposażony w głowicę pomiarową T 8000, przy prędkości skanowania 10,5 µm/s i kroku skanowania 8 µm. Analizę stanu powierzchni warstwy przetopionej prowadzono uwzględniając następujące parametry:

- średnie arytmetyczne odchylenie chropowatości powierzchni – Sa, µm
- średnie kwadratowe odchylenie chropowatości powierzchni – Sq, µm
- maksymalna wysokość wzniesienia powierzchni – Sp, µm
- maksymalna głębokość wgłębienia powierzchni – Sv, µm
- wysokość nierówności powierzchni – St, µm
- współczynnik skośności powierzchni – Ssk, -
- współczynnik skupienia – Kurtosis – Sku, -
- dziesięciopunktowa wysokość nierówności powierzchni – Sz, µm.

Przeprowadzono również analizę nośności dla powierzchni współpracujących w parze tribologicznej a także widmową analizę rozkładu przedziałów nierówności powierzchni.



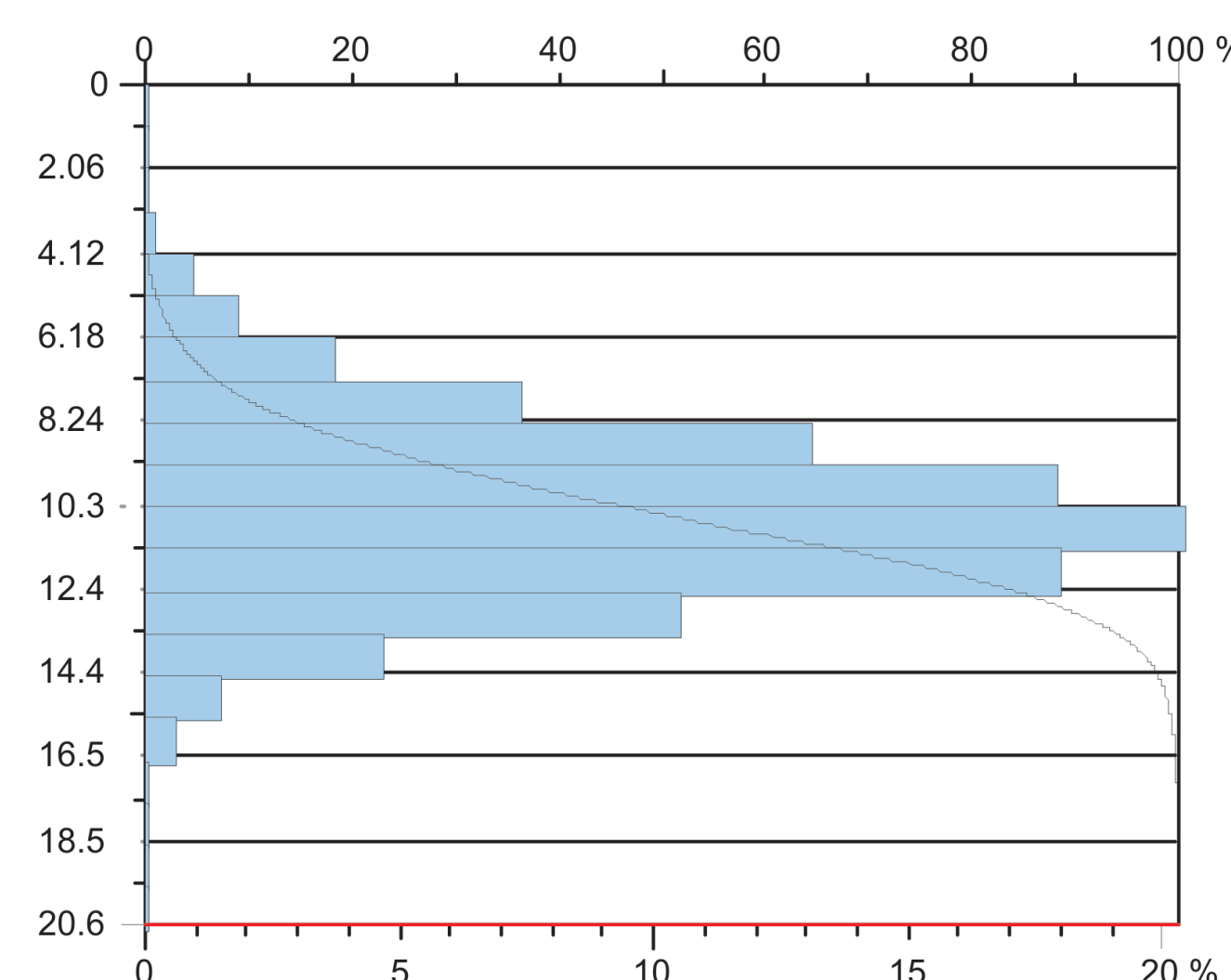
Topografia powierzchni warstwy aluminiowej modyfikowanej Hf po procesie utleniania w temperaturze 1100°C/1000h na podłożu In 100



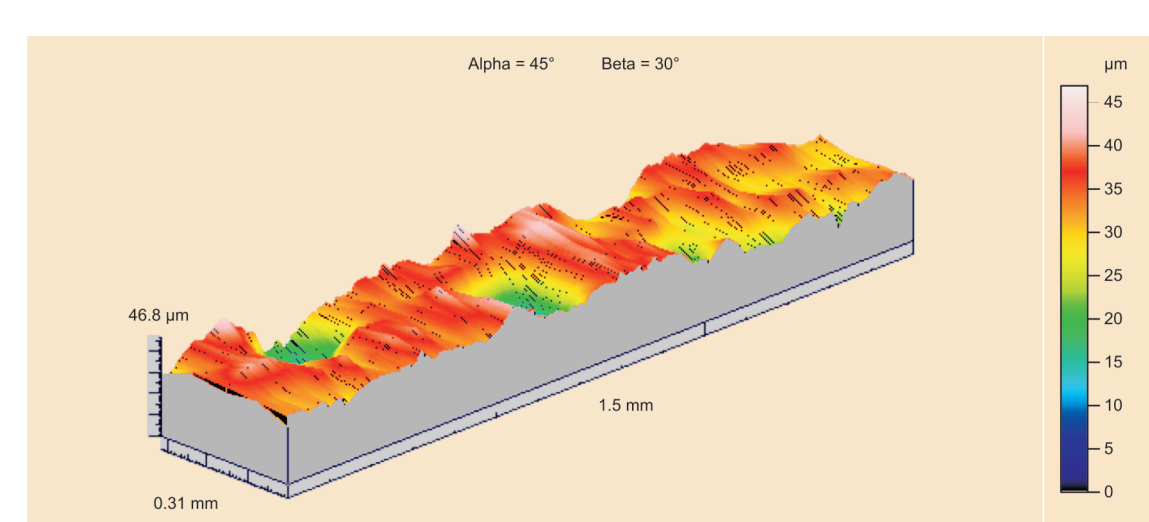
Profil chropowatości powierzchni warstwy aluminiowej modyfikowanej Hf po procesie utleniania w temperaturze 1100°C/1000h na podłożu In 100

Amplitude Parameters

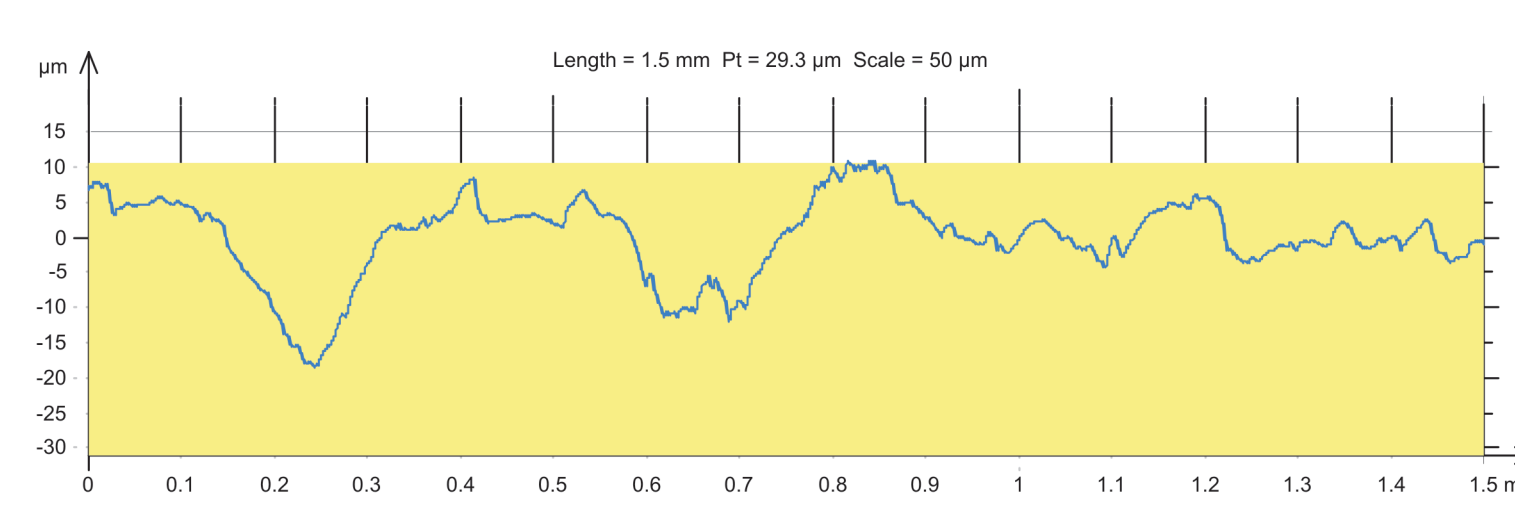
Sa = 1,64 µm
Sq = 2,09 µm
Sp = 10,5 µm
Sv = 10,1 µm
St = 20,6 µm
Ssk = 0,309
Sku = 3,57
Sz = 14,9 µm



Parametry topografii powierzchni, rozkład rzędnych i funkcja nośności powierzchni warstwy aluminiowej modyfikowanej Hf po procesie utleniania w temperaturze 1100°C/1000h na podłożu In 100



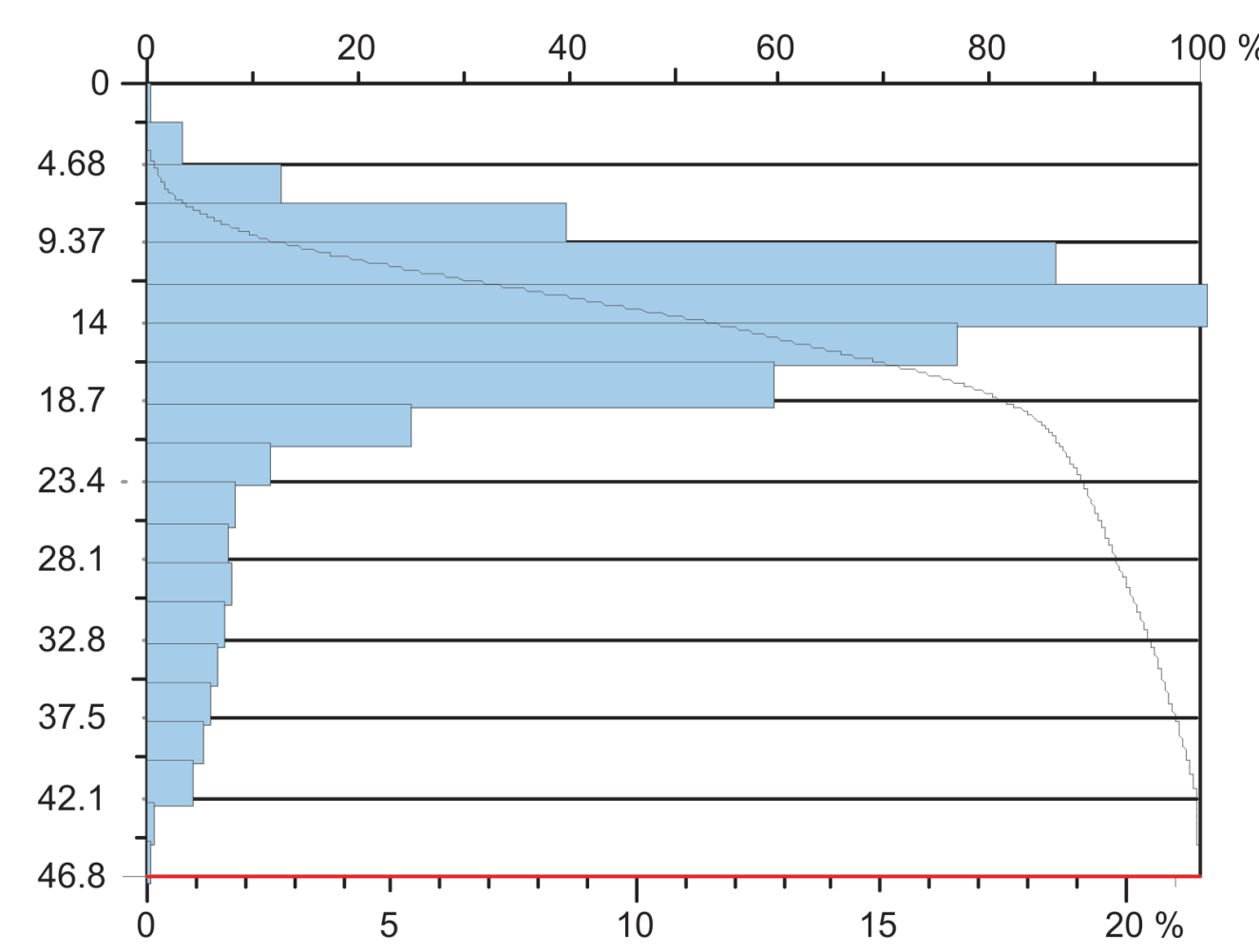
Topografia powierzchni stopu In 100 po procesie utleniania w temperaturze 1100°C/1000h



Profil chropowatości powierzchni stopu In 100 po procesie utleniania w temperaturze 1100°C/1000h

Amplitude Parameters

Sa = 5 µm
Sq = 7,1 µm
Sp = 15,5 µm
Sv = 31,3 µm
St = 46,8 µm
Ssk = -1,66
Sku = 5,96
Sz = 42,2 µm



Parametry topografii powierzchni, rozkład rzędnych i funkcja nośności powierzchni stopu In 100 po procesie utleniania w temperaturze 1100°C/1000h

Wnioski

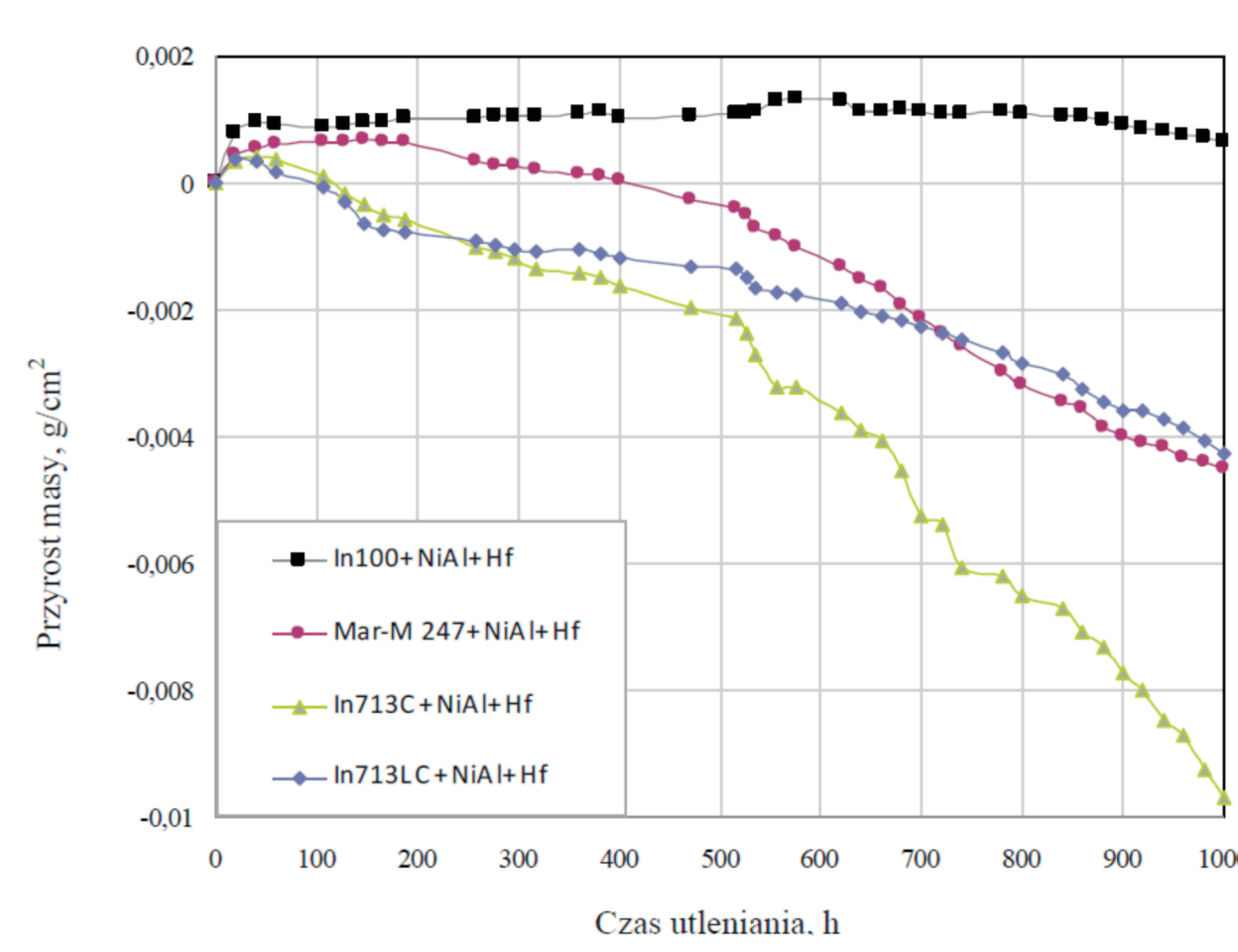
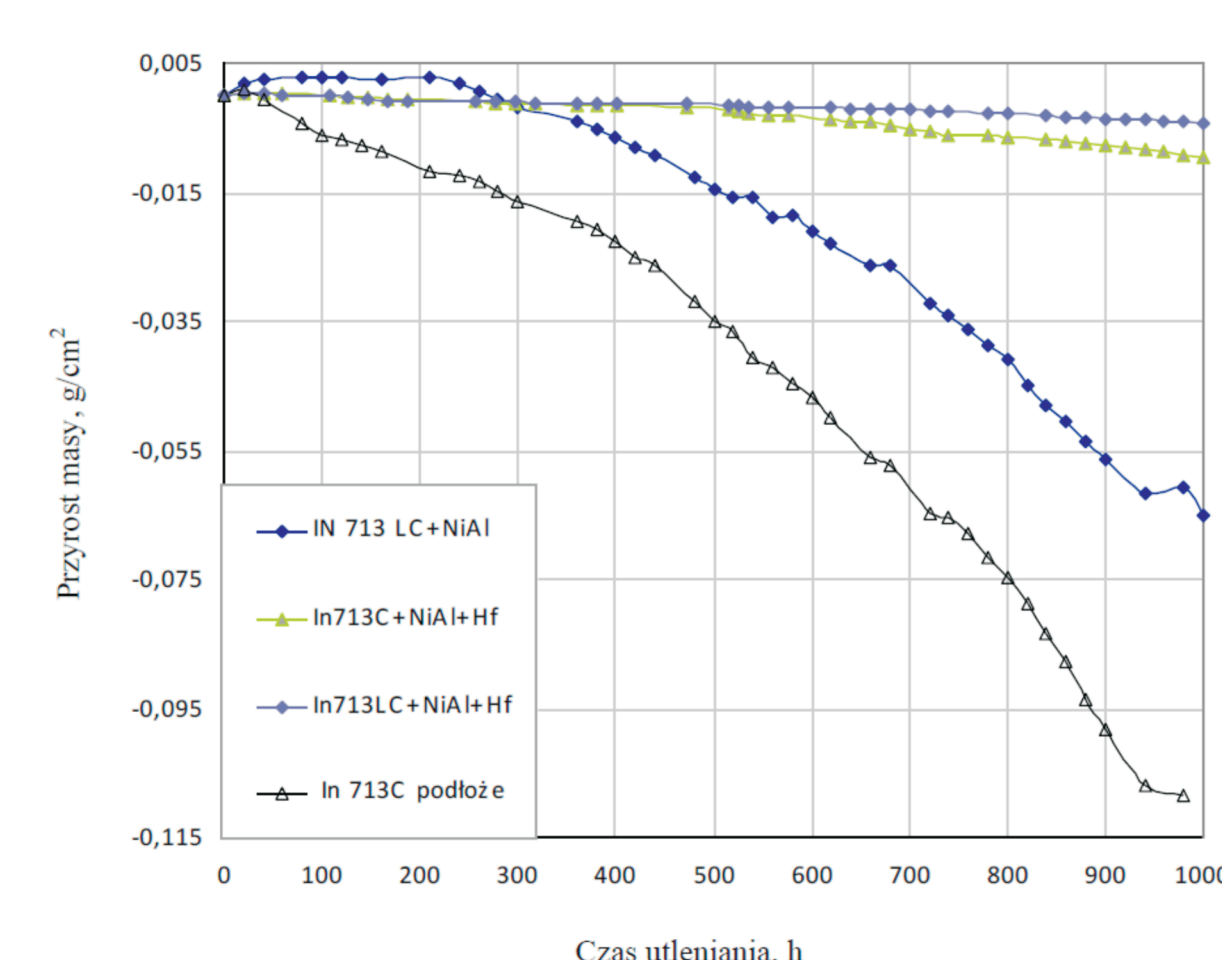
Proces utleniania prowadzony w temperaturze 1100°C w czasie 1000h wykazał wzrost odporności na korozję gazową stopów niklu z wytworzoną warstwą aluminiową w porównaniu z materiałem podłoża.

Zastosowanie procesu CVD połączonego z modyfikacją warstwy aluminiowej hafnem skutkowało wzrostem trwałości w warunkach korozji gazowej w porównaniu z konwencjonalnym procesem aluminiowania. Najlepsze właściwości wykazywał stop Inconel 100.

Analiza składu chemicznego warstwy aluminiowej po procesie utleniania wykazała największą zawartość aluminium w zewnętrznej strefie warstwy oraz zmniejszenie jego zawartości w wewnętrznych strefach warstwy. Ponadto stwierdzono obecność tlenu jako efektu procesu korozji w atmosferze powietrza. Jednocześnie w warstwie przypowierzchniowej nastąpił wzrost stężenia Cr i Ti.

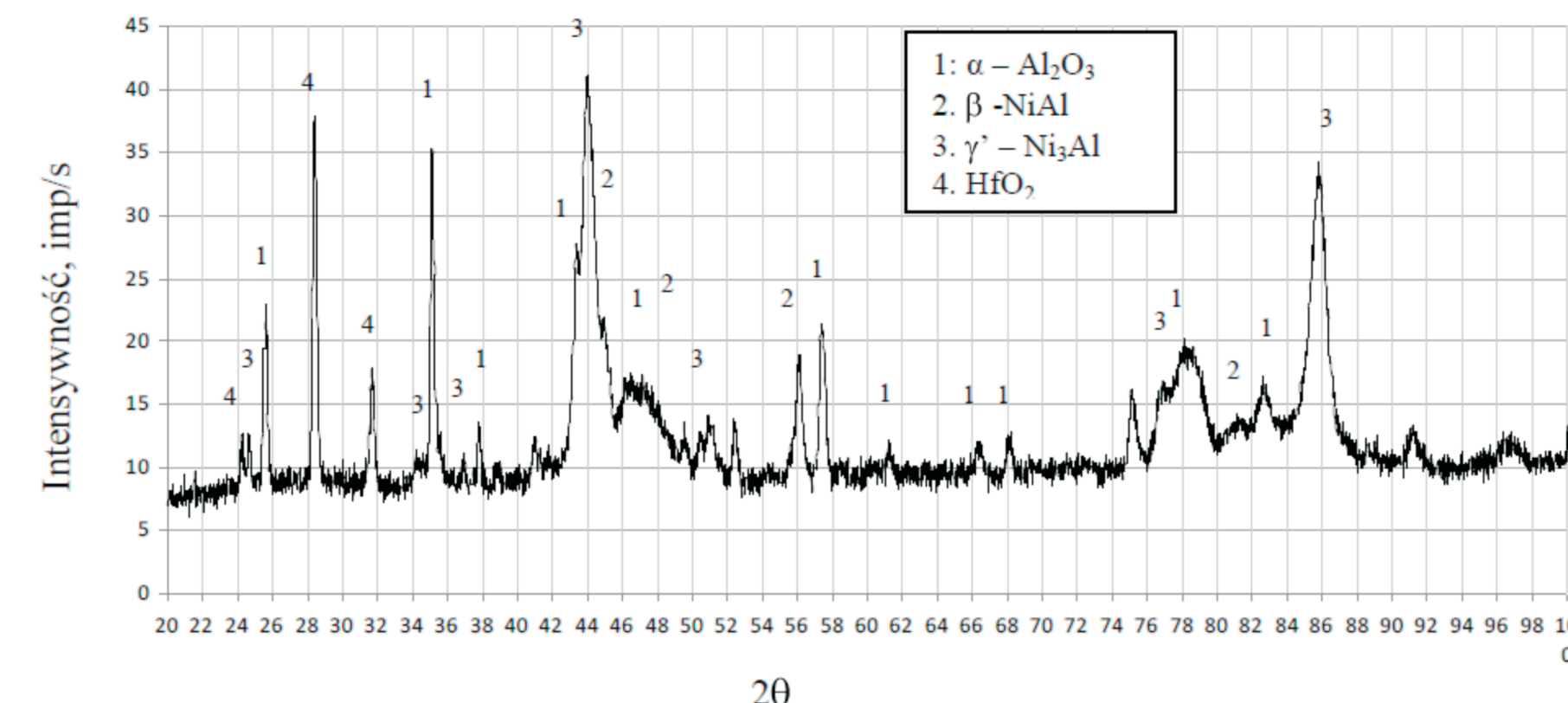
Badania składu fazowego powierzchni po testach korozyjnych ujawniły obecność fazy tlenkowej Al₂O₃ oraz NiAl, Ni₃Al. W warstwie aluminiowej modyfikowanej Hf występowała również faza HfO₂.

Badania topografii powierzchni wykazały znaczny wzrost parametrów chropowatości w skutek procesów utleniania. Największą wartość parametrów stwierdzono po utlenieniu powierzchni bez warstwy aluminiowej co wiązało się ze znaczną intensywnością procesów korozyjnych (największy ubytek masy).



Kinetyka utleniania nadstopów In 713C i In 713C+NiAl w stanie lanym (podłoże), po procesie CVD w temperaturze 1050°C/8h (In 713C+NiAl) oraz po procesie CVD modyfikowanym Hf w temperaturze 1020°C/6h (In 713C+NiAl+Hf, In 713C+NiAl+Hf)

Kinetyka utleniania nadstopów niklu w temperaturze 1100°C/1000h po procesie CVD modyfikowanym Hf w temperaturze 1020°C/6h



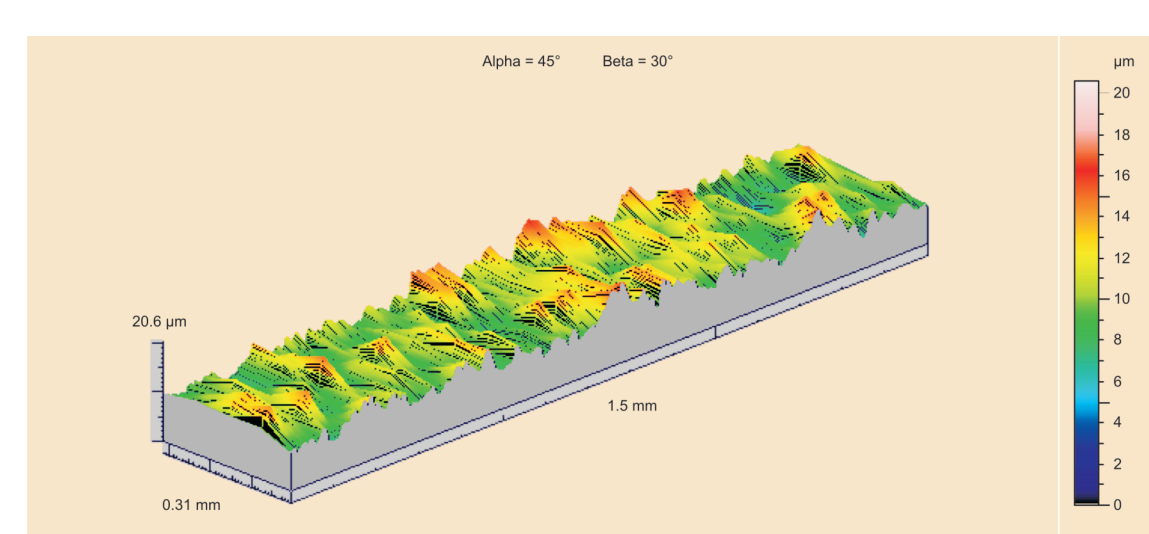
Dyfraktogram aluminiowej warstwy modyfikowanej Hf wytworzonej na podłożu z nadstopu MAR-M 247 po procesie utleniania

Ocena parametrów topograficznych powierzchni próbek poddanych badaniom odporności na korozję wysokotemperaturową.

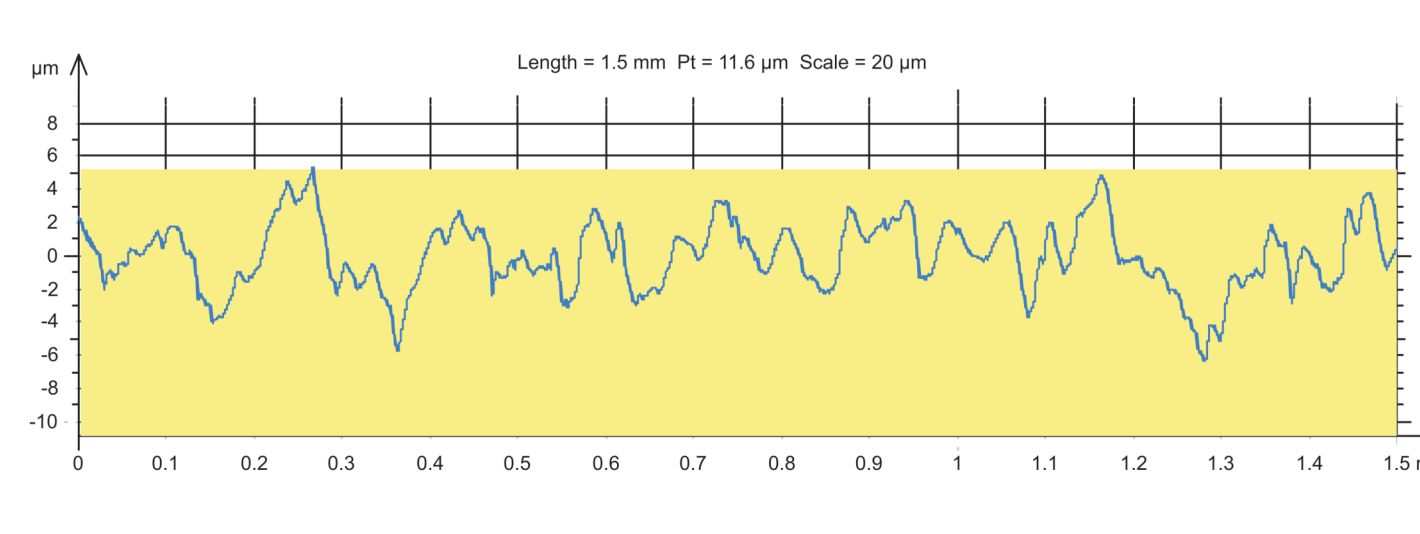
Parametry topografii powierzchni warstwy aluminiowej po procesie utleniania określono stosując skaner 3D firmy Hommelwerke wyposażony w głowicę pomiarową T 8000, przy prędkości skanowania 10,5 µm/s i kroku skanowania 8 µm. Analizę stanu powierzchni warstwy przetopionej prowadzono uwzględniając następujące parametry:

- średnie arytmetyczne odchylenie chropowatości powierzchni – Sa, µm
- średnie kwadratowe odchylenie chropowatości powierzchni – Sq, µm
- maksymalna wysokość wzniesienia powierzchni – Sp, µm
- maksymalna głębokość wgłębienia powierzchni – Sv, µm
- wysokość nierówności powierzchni – St, µm
- współczynnik skośności powierzchni – Ssk, -
- współczynnik skupienia – Kurtosis – Sku, -
- dziesięciopunktowa wysokość nierówności powierzchni – Sz, µm.

Przeprowadzono również analizę nośności dla powierzchni współpracujących w parze tribologicznej a także widmową analizę rozkładu przedziałów nierówności powierzchni.



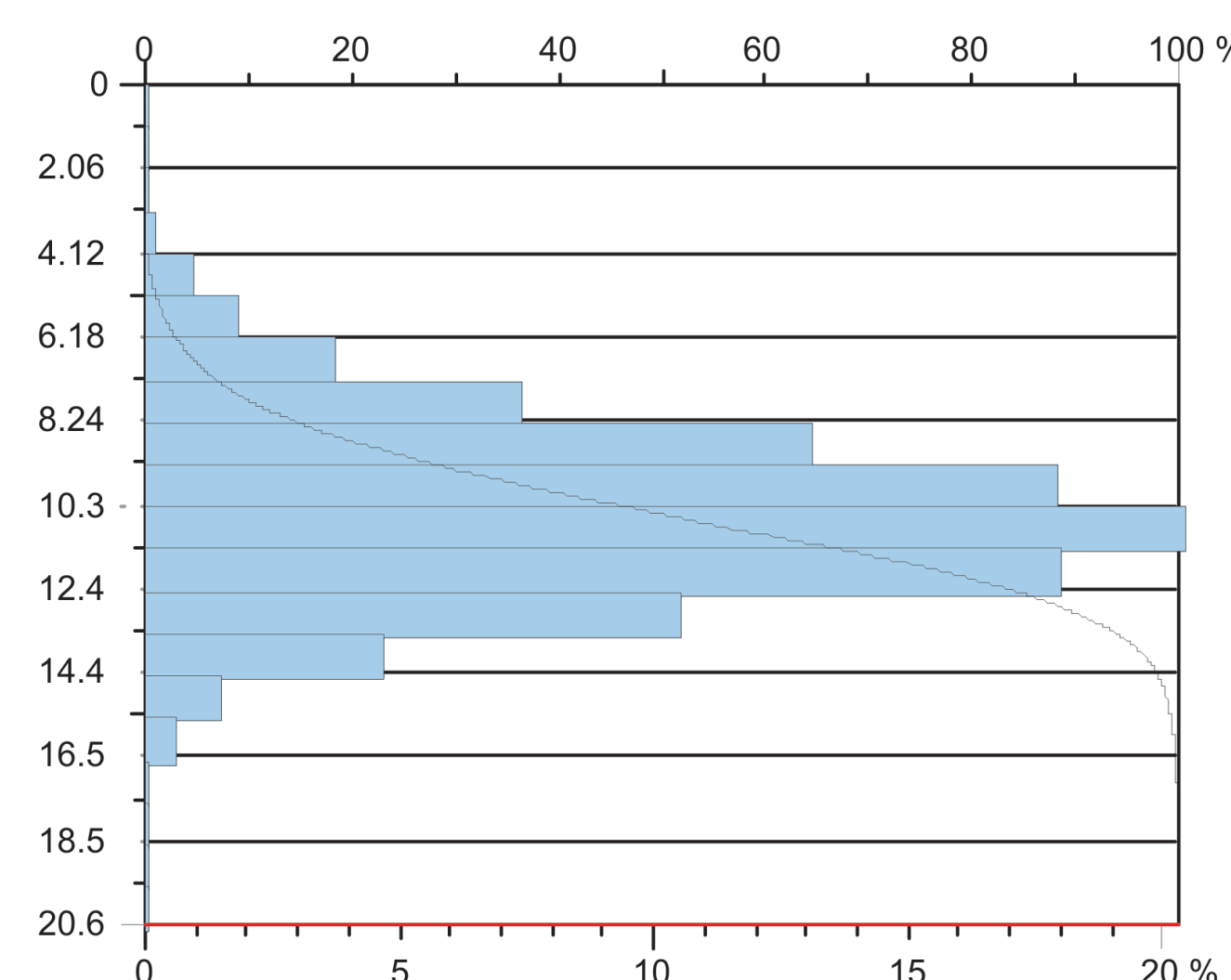
Topografia powierzchni warstwy aluminiowej modyfikowanej Hf po procesie utleniania w temperaturze 1100°C/1000h na podłożu In 100



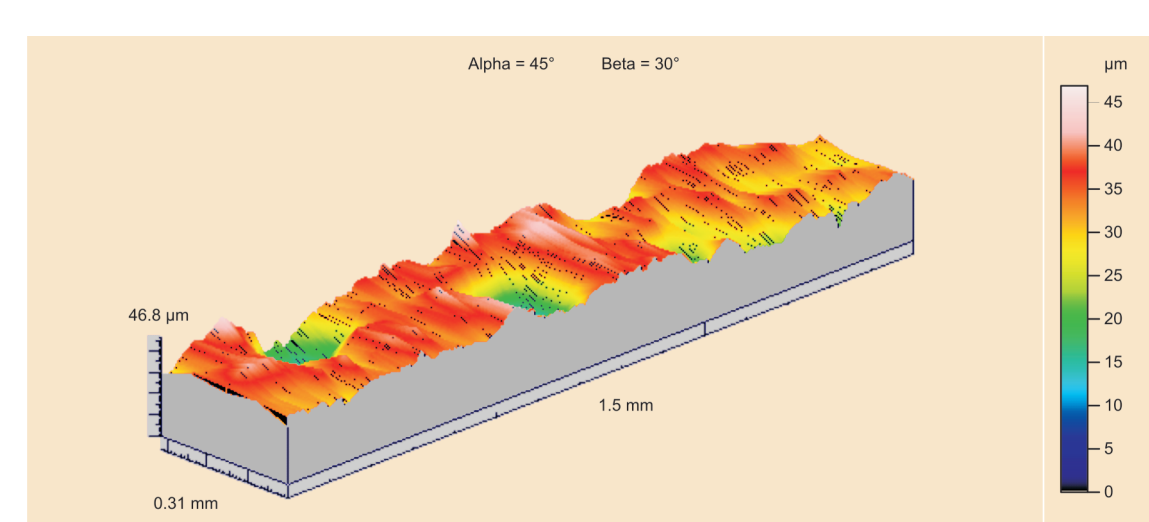
Profil chropowatości powierzchni warstwy aluminiowej modyfikowanej Hf po procesie utleniania w temperaturze 1100°C/1000h na podłożu In 100

Amplitude Parameters

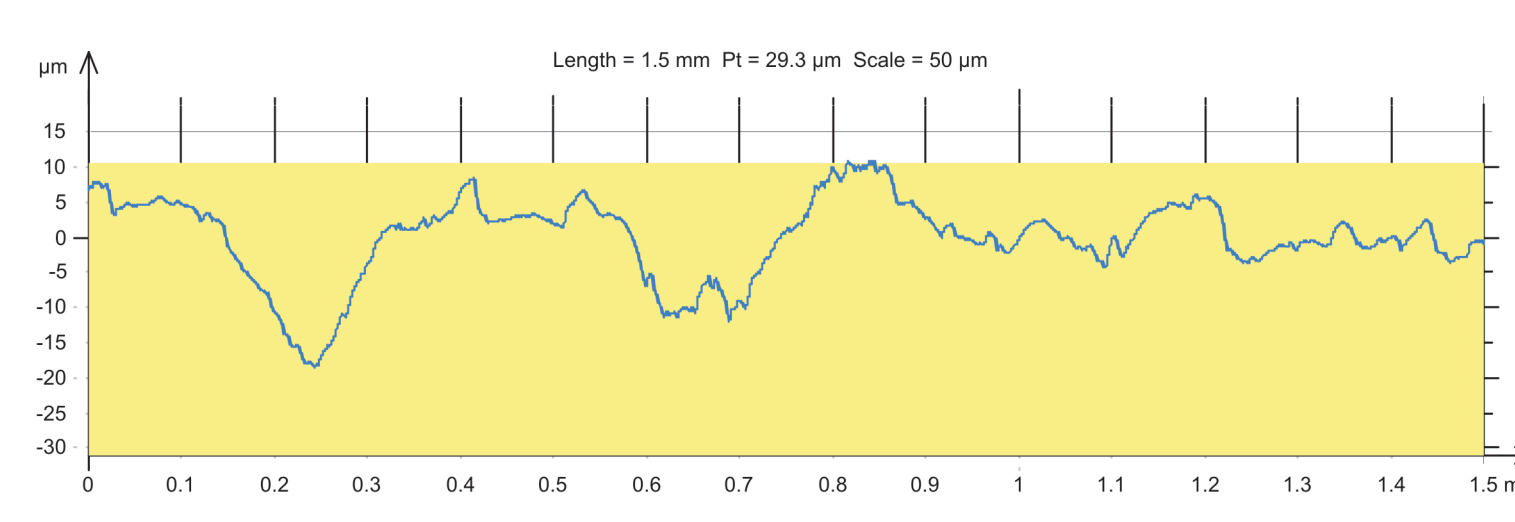
Sa = 1,64 µm
Sq = 2,09 µm
Sp = 10,5 µm
Sv = 10,1 µm
St = 20,6 µm
Ssk = 0,309
Sku = 3,57
Sz = 14,9 µm



Parametry topografii powierzchni, rozkład rzędnych i funkcja nośności powierzchni warstwy aluminiowej modyfikowanej Hf po procesie utleniania w temperaturze 1100°C/1000h na podłożu In 100



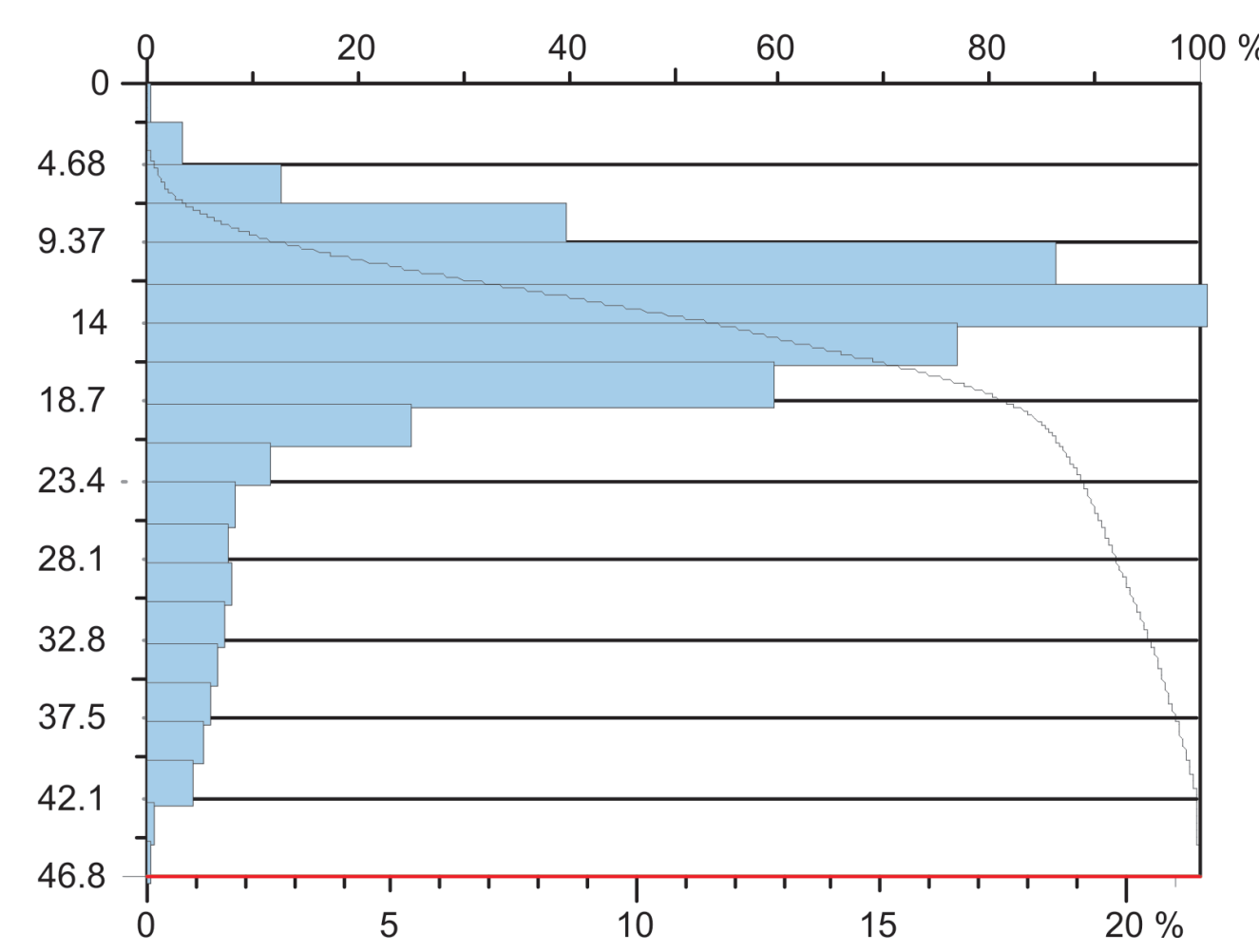
Topografia powierzchni stopu In 100 po procesie utleniania w temperaturze 1100°C/1000h



Profil chropowatości powierzchni stopu In 100 po procesie utleniania w temperaturze 1100°C/1000h

Amplitude Parameters

Sa = 5 µm
Sq = 7,1 µm
Sp = 15,5 µm
Sv = 31,3 µm
St = 46,8 µm
Ssk = -1,66
Sku = 5,96
Sz = 42,2 µm



Parametry topografii powierzchni, rozkład rzędnych i funkcja nośności powierzchni stopu In 100 po procesie utleniania w temperaturze 1100°C/1000h

Wnioski

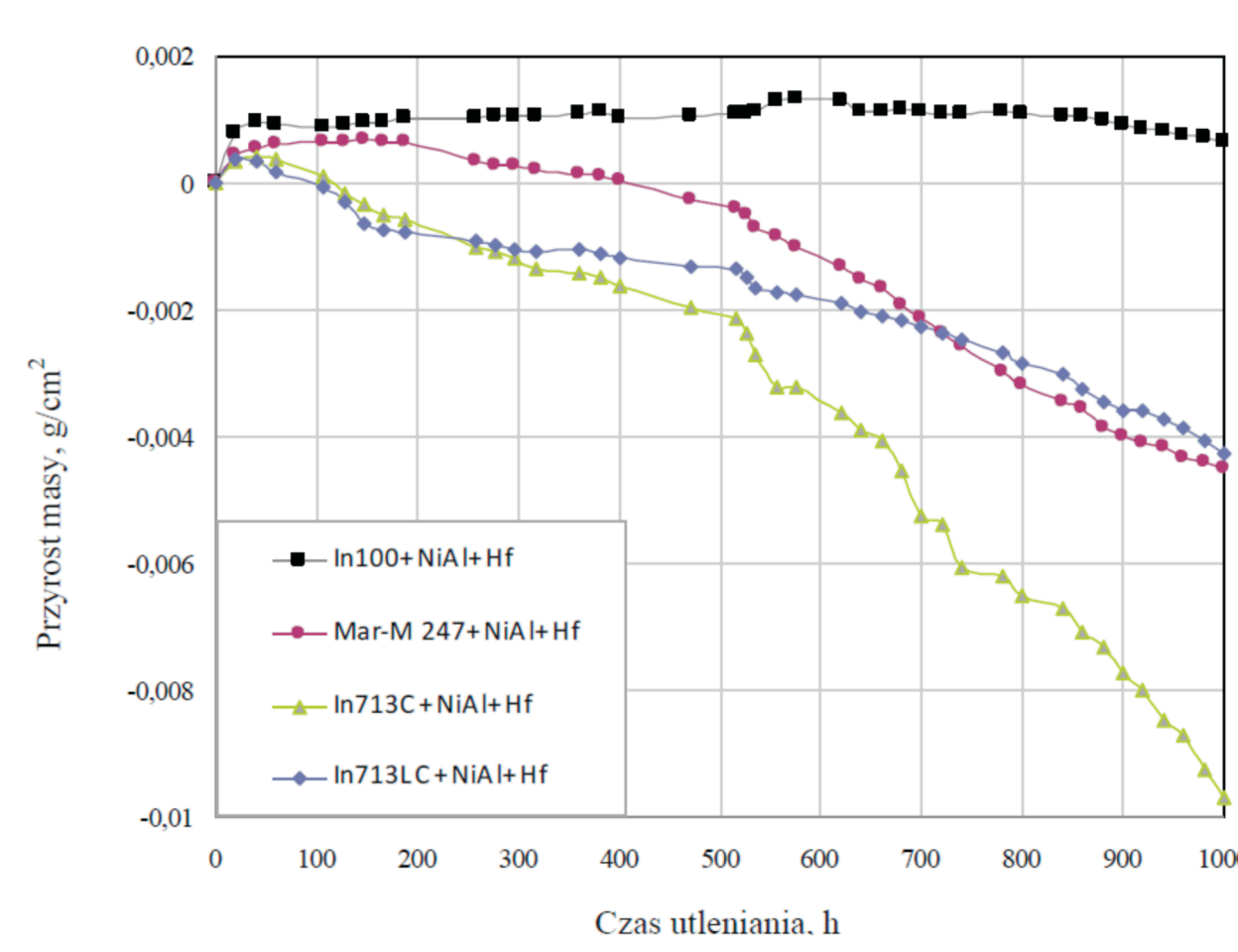
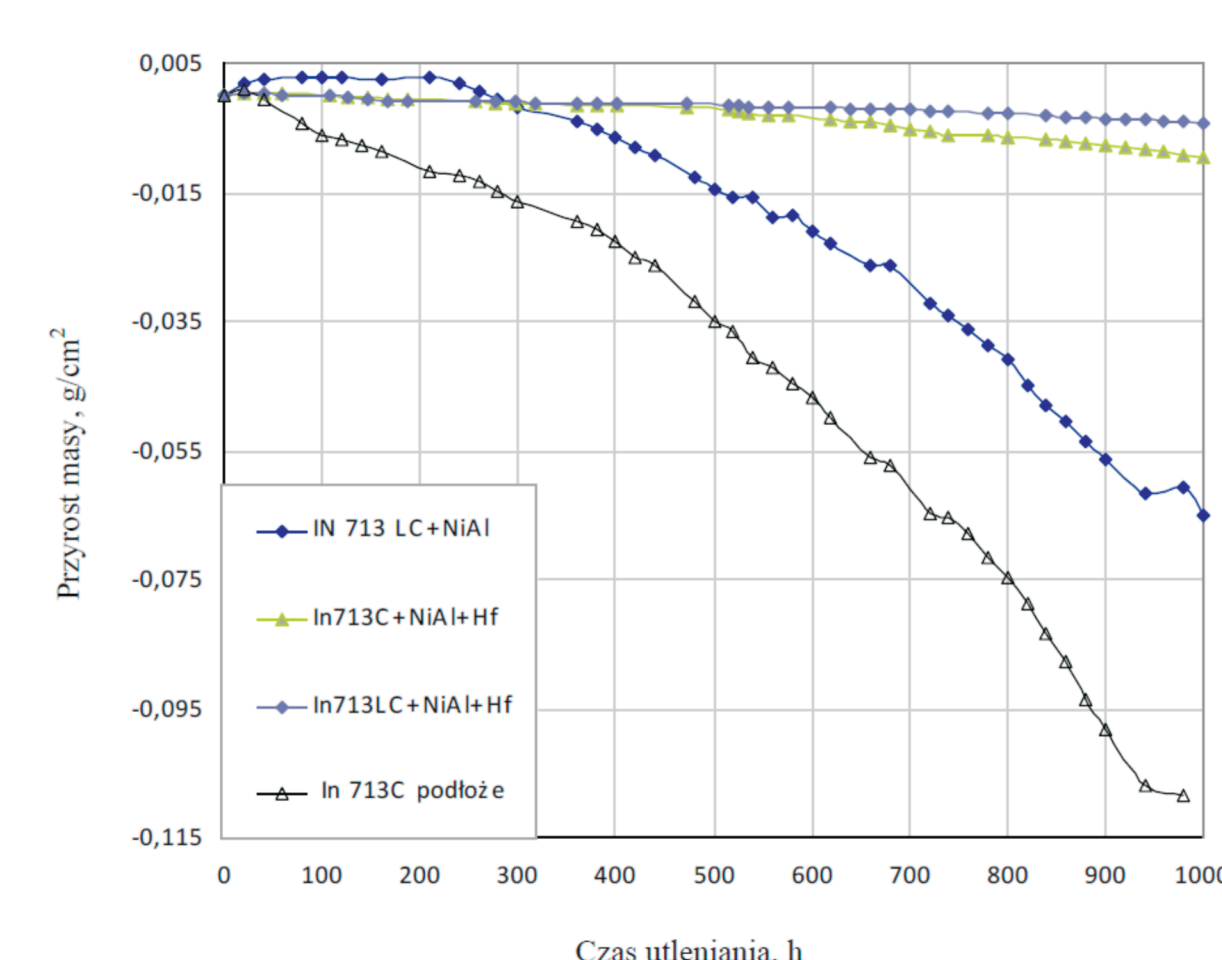
Proces utleniania prowadzony w temperaturze 1100°C w czasie 1000h wykazał wzrost odporności na korozję gazową stopów niklu z wytworzoną warstwą aluminiową w porównaniu z materiałem podłoża.

Zastosowanie procesu CVD połączonego z modyfikacją warstwy aluminiowej hafnem skutkowało wzrostem trwałości w warunkach korozji gazowej w porównaniu z konwencjonalnym procesem aluminiowania. Najlepsze właściwości wykazywał stop Inconel 100.

Analiza składu chemicznego warstwy aluminiowej po procesie utleniania wykazała największą zawartość aluminium w zewnętrznej strefie warstwy oraz zmniejszenie jego zawartości w wewnętrznych strefach warstwy. Ponadto stwierdzono obecność tlenu jako efektu procesu korozji w atmosferze powietrza. Jednocześnie w warstwie przypowierzchniowej nastąpił wzrost stężenia Cr i Ti.

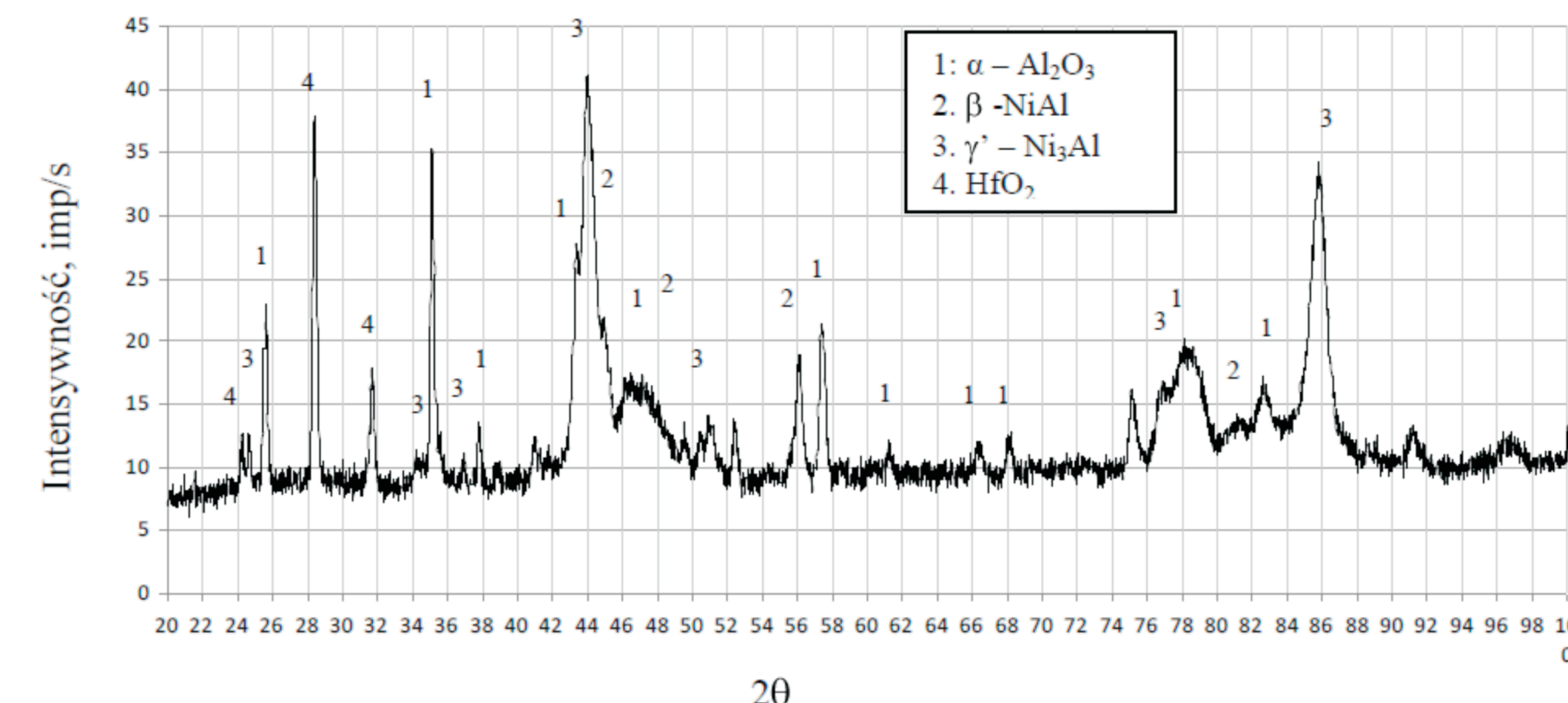
Badania składu fazowego powierzchni po testach korozyjnych ujawniły obecność fazy tlenkowej Al₂O₃ oraz NiAl, Ni₃Al. W warstwie aluminiowej modyfikowanej Hf występowała również faza HfO₂.

Badania topografii powierzchni wykazały znaczny wzrost parametrów chropowatości w skutek procesów utleniania. Największą wartość parametrów stwierdzono po utlenieniu powierzchni bez warstwy aluminiowej co wiązało się ze znaczną intensywnością procesów korozyjnych (największy ubytek masy).



Kinetyka utleniania nadstopów In 713C i In 713C+NiAl w stanie lanym (podłoże), po procesie CVD w temperaturze 1050°C/8h (In 713C+NiAl) oraz po procesie CVD modyfikowanym Hf w temperaturze 1020°C/6h (In 713C+NiAl+Hf, In 713C+NiAl+Hf)

Kinetyka utleniania nadstopów niklu w temperaturze 1100°C/1000h po procesie CVD modyfikowanym Hf w temperaturze 1020°C/6h



Dyfraktogram aluminiowej warstwy modyfikowanej Hf wytworzonej na podłożu z nadstopu MAR-M 247 po procesie utleniania

Ocena parametrów topograficznych powierzchni próbek poddanych badaniom odporności na korozję wysokotemperaturową.

Parametry topografii powierzchni warstwy aluminiowej po procesie utleniania określono stosując skaner 3D firmy Hommelwerke wyposażony w głowicę pomiarową T 8000, przy prędkości skanowania 10,5 µm/s i kroku skanowania 8 µm. Analizę stanu powierzchni warstwy przetopionej prowadzono uwzględniając następujące parametry:

- średnie arytmetyczne odchylenie chropowatości powierzchni – Sa, µm
- średnie kwadratowe odchylenie chropowatości powierzchni – Sq, µm
- maksymalna wysokość wzniesienia powierzchni – Sp, µm
- maksymalna głębokość wgłębienia powierzchni – Sv, µm
- wysokość nierówności powierzchni – St, µm
- współczynnik skośności powierzchni – Ssk, -
- współczynnik skupienia – Kurtosis – Sku, -
- dziesięciopunktowa wysokość nierówności powierzchni – Sz, µm.

Przeprowadzono również analizę nośności dla powierzchni współpracujących w parze tribologicznej a także widmową analizę rozkładu przedziałów nierówności powierzchni.

