

RZECZPOSPOLITA
POLSKA



Urząd Patentowy
Rzeczypospolitej Polskiej

⑫ OPIS PATENTOWY ⑰ PL ⑪ 168462

⑬ B1

⑳ Numer zgłoszenia: 296171

㉑ Data zgłoszenia: 05.10.1992

㉒ IntCl⁶:

C23C 10/06
C23C 10/34
F02B 77/02
F02F 3/12

⑤④

Sposób wytwarzania pokryć ochronnych na elementach ze stopów niklu lub kobaltu oraz stopów żelaza lub tytanu zwłaszcza na elementach silników spalinowych

④③

Zgłoszenie ogłoszono:
18.04.1994 BUP 08/94

④⑤

O udzieleniu patentu ogłoszono:
29.02.1996 WUP 02/96

⑦③

Uprawniony z patentu:
Politechnika Śląska, Gliwice, PL

⑦②

Twórcy wynalazku:
Lucjan Swadźba, Tychy, PL
Bolesław Formanek, Katowice, PL
Adolf Maciejny, Katowice, PL
Bogusław Mendala, Siemianowice, PL
Roland Streiff, Marseille, FR

⑦④

Pełnomocnik:
Ziółkowska Urszula, Politechnika Śląska

⑤⑦

1. Sposób wytwarzania pokryć ochronnych na elementach ze stopów niklu lub kobaltu oraz stopów żelaza lub tytanu, zwłaszcza na elementach silników spalinowych, metodą natryskiwania cieplnego proszkami ceramicznymi lub metaloceramicznymi pokrytymi warstwą niklu lub kobaltu lub platyny, przy czym elementy ze stopów żelaza lub tytanu przed procesem natryskiwania cieplnego poddaje się niklowaniu, kobaltowaniu lub platynowaniu, **znamienny tym**, że po procesie natryskiwania cieplnego elementy z uzyskaną powłoką ceramiczną lub metaloceramiczną poddaje się nasyceniu dyfuzyjnemu.

PL 168462 B1

SPOSÓB WYTWARZANIA POKRYĆ OCHRONNYCH NA ELEMENTACH ZE STOPÓW
NIKLU LUB KOBALTU ORAZ STOPÓW ŻELAZA LUB TYTANU, ZWŁASZCZA
NA ELEMENTACH SILNIKÓW SPALINOWYCH

Z a s t r z e ż e n i a p a t e n t o w e

1. Sposób wytwarzania pokryć ochronnych na elementach ze stopów niklu lub kobaltu oraz stopów żelaza lub tytanu, zwłaszcza na elementach silników spalinowych, metodą natryskiwania cieplnego proszkami ceramicznymi lub metaloceramicznymi pokrytymi warstwą niklu lub kobaltu lub platyny, przy czym elementy ze stopów żelaza lub tytanu przed procesem natryskiwania cieplnego poddaje się niklowaniu, kobaltowaniu lub platynowaniu, z n a m i e n n y t y m, że po procesie natryskiwania cieplnego elementy z uzyskaną powłoką ceramiczną lub metaloceramiczną poddaje się nasyceniu dyfuzyjnemu.

2. Sposób według zastrz. 1, z n a m i e n n y t y m, że proces dyfuzyjnego nasycania następujący po procesie natryskiwania cieplnego prowadzi się w mieszaninach zawierających stopowe proszki chromu lub niklu lub żelaza z aluminium lub ich dowolne mieszaniny i/lub obojętne wypełnienie w postaci tlenku aluminium.

3. Sposób według zastrz. 1, z n a m i e n n y t y m, że nasycanie dyfuzyjne prowadzi się metodą gazową, kontaktową lub kontaktowo-gazową.

4. Sposób według zastrz. 1, z n a m i e n n y t y m, że nasycanie dyfuzyjne prowadzi się metodą natryskiwania zawiesin ciekłych z następnym wygrzewaniem dyfuzyjnym.

* * *

Przedmiotem wynalazku jest sposób wytwarzania pokryć ochronnych na elementach ze stopów niklu lub kobaltu oraz stopów żelaza lub tytanu, zwłaszcza na elementach silników spalinowych do ich ochrony przed korozją w środowisku związków siarki.

Zwiększenie trwałości elementów silników spalinowych stosowanych w energetyce oraz lotnictwie, takich jak łopatki kierujące i wirujące, komory spalania i inne osiąga się przez zastosowanie warstw ochronnych metalowych lub ceramicznych otrzymywanych metodami nasycenia w proszkach, natryskiwania zawiesiny z wygrzewaniem dyfuzyjnym oraz natryskiwania cieplnego.

Zasadniczy postęp w ochronie powierzchni elementów silników pozwalający na znaczne zwiększenie temperatury ich eksploatacji, a zatem na podwyższenie ich sprawności, dokonany został po opracowaniu pokryć stanowiących bariery cieplne. Zasadnicza rola jaką odgrywają bariery polega zarówno na ich wysokiej odporności na korozję jak również na obniżeniu temperatury materiału podłoża. Jako materiał barier cieplnych stosuje się tlenek glinu oraz tlenek cyrkonu stabilizowany tlenkiem itru. Tlenki te charakteryzują się wysoką stabilnością temperaturową, a tlenek cyrkonu niską przewodnością cieplną. W temperaturze 1273 do 1473 K, przy szybkości gazów charakterystycznych dla silnika lotniczego, spadek temperatury dla pokryć tlenku cyrkonu wynosi 464 K., podczas gdy dla stopu żarowytrzymałego 40 K. Wadą pokryć z tlenku cyrkonu jest jego podatność do przemian polimorficznych, które powodują zmiany objętości i niską odporność tego typu warstw na cykliczne zmienne obciążenia cieplne.

Pokrycie tlenku glinu o grubości 0,2 mm pozwalają na obniżenie temperatury materiału podłoża o 400°C podczas gdy powłoka metalowa 15 razy grubsza, pozwala na obniżenie temperatury tego podłoża o 300°C. Najbardziej interesująca jest możliwość zastosowania pokryć-barier cieplnych w odniesieniu do łopatek turbin. Stosując tego typu warstwy można zrealizować dwa zasadnicze cele. Po pierwsze można przy stałej temperaturze materiału łopatek podwyższyć temperaturę gazów przed turbiną o około 100 K co prowadzi do zmniejszenia zużycia paliwa o 1,3%. Po drugie, nie zmieniając temperatury gazów przed turbiną, można zwiększyć trwałość łopatek czterokrotnie w wyniku obniżenia temperatury ich pracy.

Znane jest zastosowanie pokryć na łopatki turbiny pierwszego stopnia chłodzone w warunkach eksperymentalnych. Zastosowano pokrycie, w którym strefę zewnętrzną stanowiły tlenki ZrO_2 -12% Y_2O_3 zaś międzywarstwa granicząca z podłożem miała skład: Ni-osnowa, Cr-16%, Al-8%, Y-0,6%. Temperatura gazów przed turbiną wynosiła 1703 K. Niszczenie pokryć polegało na ich pękaniu w miejscu występowania największych naprężeń i temperatury. Niszczenie pokryć w próbach cyklicznego utleniania zachodzi poprzez złuszczenie warstwy ceramicznej na granicy z międzywarstwą. Znaczna różnica we współczynnikach rozszerzalności cieplnej pomiędzy materiałem podłoża a pokryciem ceramicznym stwarza konieczność stosowania warstw pośrednich, które kompensowałyby tak znaczne zróżnicowanie we współczynnikach rozszerzalności cieplnej. Znane jest stosowanie warstw pośrednich /międzywarstw/ pomiędzy warstwą ceramiczną a stopem-materiałem podłoża takich jak NiCrAlY, CoCrAlY, NiCr oraz NiAl. Szczególnie korzystne jest stosowanie jako międzywarstwy związku NiAl, mającego pośrednie własności pomiędzy podłożem a warstwą ceramiczną oraz doskonałą przyczepność do podłoża.

Pokrycia ceramiczne Al_2O_3 /tlenek aluminium/ oraz ZrO_2 - 8% Y_2O_3 jak również międzywarstwy NiCrAlY, CoCrAlY, NiAl oraz NiCr nanosi się metodą natryskiwania plazmowego w atmosferze powietrza lub pod obniżonym ciśnieniem. Dla uzyskania przyczepności pokryć do podłoża elementy ze stopów żarowytrzymałych poddaje się obróbce strumieniowo-ciernej w celu rozwinięcia powierzchni.

Znane są pokrycia nanoszone na elementy turbin gazowych metodą odparowania stopu o określonym składzie przy pomocy wiązki elektronowej. Są to pokrycia MCrAlY gdzie M oznacza jeden z pierwiastków: Ni, Co, Fe. Jako przykładowe można przytoczyć stopy odparowane wiązką o następującym składzie chemicznym w % wag.: FeCrAlY/Cr 26-29%, Al 12-14%, Y 0,6-0,9%; NiCrAlY/Cr 20-35%, Al 15-20%, Y 0,05-0,3%; CoCrAlY/Cr 19-25%, Al 12-15%, Y 0,01-0,5%; NiCoCrAlY/Cr 14-22%, Al 10-13%, Y 0,01-1,0%. Warstwy otrzymane przez odparowanie wiązką elektronową wykazują bardzo wysoką odporność na korozję w środowisku zawierającym związki siarki. Technologia ich otrzymywania jest bardzo skomplikowana i droga.

Opisane powyżej metody otrzymywania pokryć ochronnych na elementach turbin stacjonarnych oraz silników lotniczych mają ograniczone zastosowanie z przyczyn, które zostały częściowo opisane. Główne przyczyny ograniczonego zastosowania pokryć-barier cieplnych w odniesieniu do łopatek kierujących i wirujących są następujące: słaba przyczepność warstw ceramicznych do stopu żarowytrzymałego, pomimo stosowania warstw podkładowych, kompensujących różnicę w rozszerzalności cieplnej pokrycia i materiału podłoża, adhezyjny charakter połączenia pomiędzy pokryciem ceramicznym międzywarstwą oraz materiałem podłoża, brak możliwości dokładnej kontroli grubości pokrycia. Najważniejszą jednak wadą technologii otrzymywania pokryć jest konieczność rozwinięcia powierzchni przez obóbkę strumieniowo-ścierną przed naniesieniem pokrycia. Obróbka strumieniowo-ścierna powoduje znaczną zmianę stanu powierzchni wprowadzając naprężenia rozciągające bardzo niekorzystne z punktu widzenia wytrzymałości zmęczeniowej łopatek. Ponadto oddziaływanie strumieniem ścierniwa na bardzo precyzyjnie wykonane krawędzie natarcia i spływu łopatek prowadzi do ich mechanicznego uszkodzenia.

Najważniejszą wadą stosowanych dotychczas metod otrzymywania pokryć stanowiących bariery cieplne jest brak możliwości ochrony przed korozją wewnętrznych kanałów chłodzących łopatek. Łopatki chłodzone wykonywane są jako odlewane cieńkościenne konstrukcje z układem skomplikowanych kanałów chłodzących, przez które przepływa powietrze obniżając temperaturę powierzchni łopatek. Powierzchnie te narażone są również na korozję. Dotychczas stosowana technologia nakładania pokryć barier cieplnych przez natryskiwanie plazmowe nie pozwala na pokrywanie wewnętrznych kanałów chłodzących, dlatego cienkie ścianki łopatek narażone są na zużycie korozyjne. Metoda otrzymywania pokryć ochronnych polegająca na odparowaniu stopów o określonym składzie wiązką elektronową, również nie zapewnia możliwości ochrony wewnętrznych kanałów w łopatkach. Metoda nasycania dyfuzyjnego stosowana jest do otrzymywania warstw dyfuzyjnych na bazie aluminidków niklu wówczas gdy element wykonany jest z żarowytrzymałego stopu na bazie niklu bądź aluminidków kobaltu na elementach wykonanych ze stopów kobaltu. Rozwój pokryć doprowadził do opracowania warstw dyfuzyjnych, których własności ochronne są wyższe niż warstw aluminowych, a które zawierają inne pierwiastki zwiększające ich odporność na korozję w pod-

wyższej temperaturze. Osnową tych warstw są aluminidki. Warstwy tego typu noszą nazwę warstw modyfikowanych i otrzymywane są w procesie: chromoaluminowania/warstwy Cr-Al/, krzemoaluminowania /warstwy Si-Al/. Do warstw modyfikowanych zalicza się również warstwy Al-Pt otrzymywane w procesie dwuetapowym. W pierwszym etapie na powierzchnię elementu wykonanego ze stopu niklu lub kobaltu nanosi się metodą galwaniczną warstwę platyny o grubości od 5 do 15 μm , po czym w etapie drugim, pokryty platyną element, poddaje się dyfuzyjnemu aluminowaniu w proszkach. Dyfuzyjne warstwy Al, Al-Si, Al-Cr oraz Al-Pt znalazły zastosowanie jako ochrona przed korozją w podwyższonej temperaturze łopatek kierujących i wirujących.

Efektywną metodą otrzymywania warstw ochronnych-dyfuzyjnych Al oraz Al-Cr - jest metoda natryskiwania zawiesiny zawierającej aluminium lub aluminium i krzem z następnym wygrzewaniem dyfuzyjnym w temperaturze od 1023 do 1273 K. Stabilność warstw dyfuzyjnych w wysokiej temperaturze zależy od składu chemicznego stopu żarowytrzymałego, na którym została otrzymana. W toku eksploatacji warstw następuje utrata własności ochronnych wskutek dyfuzji aluminium do materiału podstawowego oraz niklu lub kobaltu na zewnątrz. Dyfuzja tych pierwiastków prowadzi ponadto do obniżenia własności mechanicznych elementów.

Sposób wytwarzania powłok ochronnych według wynalazku, zwany w dalszej treści opisu metodą adhezyjno-dyfuzyjną, polegający na tym, że na elementy silników spalinowych ze stopów niklu lub kobaltu oraz stopów żelaza lub tytanu nanosi się metodą natryskiwania cieplnego proszki ceramiczne lub metaloceramiczne pokryte warstwą niklu lub kobaltu lub platyny, przy czym elementy ze stopów żelaza lub tytanu przed procesem natryskiwania cieplnego poddaje się niklowaniu, kobaltowaniu lub platynowaniu, charakteryzuje się tym, że po procesie natryskiwania cieplnego elementy z uzyskaną powłoką ceramiczną lub metaloceramiczną poddaje się nasycaniu dyfuzyjnemu. Proces dyfuzyjnego nasycania następujący po procesie natryskiwania cieplnego prowadzi się korzystnie w mieszaninach zawierających stopowe proszki chromu lub - niklu lub żelaza z aluminium lub ich mieszaniny i/lub obojętne wypełnienie w postaci tlenku aluminium. Nasycenie dyfuzyjne korzystnie prowadzi się metodą gazową, kontaktową lub kontaktowo-gazową, albo metodą natryskiwania zawiesin ciekłych z następnym wygrzewaniem dyfuzyjnym, w temperaturze od 1273 do 1473 K w czasie od 5 do 40 godzin.

Stwierdzono nieoczekiwanie, że w wyniku poddania, uzyskanej po procesie natryskiwania cieplnego powłoki ceramicznej lub metaloceramicznej, nasycaniu dyfuzyjnemu sposobem według wynalazku otrzymuje się pokrycie adhezyjno-dyfuzyjne, którego struktura na powierzchni składa się z zewnętrznej strefy pokrycia ceramicznego lub metaloceramicznego oraz dyfuzyjnej strefy pomiędzy strefą zewnętrzną a podłożem. Strefa pomiędzy strefą zewnętrzną-ceramiczną a podłożem zawiera fazy aluminium i niklu lub aluminium i kobaltu lub aluminium i platyny o bardzo silnym dyfuzyjnym połączeniu z podłożem. Strefa dyfuzyjna łączy zewnętrzną strefę-ceramiczną poprzez utworzone w niej związki aluminium z kobaltem lub niklem lub platyną. Połączenie to ma również charakter dyfuzyjny. Tak więc sposób według wynalazku pozwala w nieznanym dotychczas sposobie otrzymać pokrycia adhezyjno-dyfuzyjne o bardzo wysokiej przyczepności do podłoża, bez konieczności stosowania obróbki strumieniowo-ściernej elementów.

Utrata własności ochronnych przez pokrycia stanowiące bariery cieplne otrzymywane według znanych i stosowanych dotychczas technologii, polega na ich pękaniu pod wpływem obciążeń mechanicznych lub cieplnych, co jest bardzo niebezpieczne szczególnie dla łopatek turbin. Powyższych wad pozbawiony jest sposób otrzymywania powłok według wynalazku, gdyż nawet w przypadku gdy złuszczeniu ulegnie zewnętrzna warstwa ceramiczna, znajdująca się poniżej warstwa dyfuzyjna związków NiAl lub CoAl lub PtAl skutecznie chroni materiał podłoża przed oddziaływaniem agresywnej atmosfery. Złuszczenie powłoki otrzymanego według znanych technologii powoduje odsłonięcie podłoża-stopu żarowytrzymałego bardzo wrażliwego na korozję w środowisku zawierającym związki siarki.

Poniżej przedstawiono przykłady ilustrujące sposób wytwarzania adhezyjno-dyfuzyjnych powłok ochronnych na elementach silników spalinowych.

P r z y k ł a d I. Łopatkę turbiny gazowej wykonaną metodą odlewania z wewnętrznymi kanałami chłodzącymi, ze stopu na bazie niklu o składzie chemicznym /w % wagowych/: Ni-osnowa; 8,0Cr; 10Co; 6,0Mo; 6,0Al; 1,0Ti; 4,3Ta; 0,1C; 0,015B; 0,10Zr; 1,5Hf poddano natryskiwaniu cieplnemu tlenkiem cyrkonu zawierającym 8% tlenku itru. Proszek do natryskiwania poddano uprzednio galwanicznemu niklowaniu. Natryskiwanie prowadzono w atmosferze powietrza. Łopatka z warstwą adhezyjną poddana została procesowi dyfuzyjnego nasycania w mieszaninie do chromoaluminowania w temperaturze 1323 K. Otrzymano w ten sposób na łopatkce pokrycie ochronne, którego struktura jest następująca: na powierzchni zewnętrznej łopatki pokrycie zawiera strefę ceramiczną $ZrO_2 \cdot xY_2O_3$, pod którą występuje strefa dyfuzyjna NiAl stanowiąca połączenie pomiędzy strefą ceramiczną a materiałem podłoża łopatki. Strefa NiAl na granicy z podłożem ma strukturę, której charakterystyczną cechą są obecne w niej wydzielienia o wydłużonym kształcie, prostopadle do powierzchni. Taka struktura zapewnia wysoką odporność na korozję oraz dużą przyczepność do podłoża. Łopatka turbiny wykonana ze stopu żarowytrzymałego na bazie niklu pokryta została na zewnętrznej powierzchni warstwą ceramiczną stanowiącą barierę cieplną zwiększającą odporność na korozję wysokotemperaturową i obniżającą temperaturę powierzchni łopatki. W kanałach chłodzących otrzymano dyfuzyjną warstwę NiAl o wysokiej odporności na korozję.

P r z y k ł a d II. Łopatkę turbiny wykonaną z żarowytrzymałego stopu na bazie niklu o składzie chemicznym /w % wagowych/: Ni-osnowa; 14Cr; 9,5Co; 4,0Mo; 4,0W; 3,0Al; 5,0Ti; 0,17C; 0,015B; 0,03Zr; z wewnętrznymi kanałami chłodzącymi poddano natryskiwaniu cieplnemu tlenkiem aluminium, którego ziarna zostały uprzednio poddane niklowaniu znanym sposobem. Łopatkę z wytworzoną na zewnętrznej powierzchni powłoką Al_2O_3 -Ni poddano następnie procesowi dyfuzyjnego nasycania w proszku zawierającym stop niklu i aluminium o zawartości 30% wagowych niklu oraz halogenkowy aktywator w ilości 1% wagowy w stosunku do ciężaru proszku. Proces dyfuzyjnego nasycania prowadzono w temperaturze 1323 K. Obrobiona w ten sposób łopatka posiadała pokrycie zarówno na powierzchni jak również w wewnętrznych kanałach chłodzących. Powierzchnia zewnętrzna łopatki pokryta była warstwą ceramiczną Al_2O_3 z dyfuzyjnym połączeniem z materiałem podłoża poprzez związek NiAl powstający w procesie dyfuzyjnego nasycania. W kanałach chłodzących powstała dyfuzyjna warstwa ochronna składająca się ze strefy zewnętrznej NiAl oraz przejściowej, na granicy z podłożem, zawierająca wydzielienia o zwiększonej, w stosunku do podłoża i strefy zewnętrznej, koncentracji chromu, molibdenu, wolframu i tytanu. Otrzymane pokrycie nadaje łopatkce wysoką odporność na korozję, zarówno na powierzchni zewnętrznej jak również w kanałach chłodzących, wysoką przyczepność do podłoża. Ponadto zastosowane pokrycie ceramiczne stanowi barierę cieplną obniżając temperaturę materiału podłoża.

P r z y k ł a d III. Łopatkę turbiny wykonaną z żarowytrzymałego stopu na bazie niklu o składzie chemicznym /w % wagowych/: Ni-osnowa; 16Cr; 8,5Co; 1,8Mo; 2,5W; 3,5Al; 0,7Nb; 1,6Ta; 0,15C; 0,008B; i 0,08Zr poddano natryskiwaniu cieplnemu przy pomocy pistoletu plazmowego, tlenkiem aluminium zawierającym 5% wagowych niklu a następnie dyfuzyjnemu aluminowaniu w proszku stopu żelazo-aluminium zawierającym 40% wagowych aluminium z dodatkiem 1% w stosunku do ciężaru proszku, halogenkowego aktywatora. Proces aluminowania prowadzono w temperaturze 1323 K. Na powierzchni łopatki otrzymano pokrycie, w którym strefa zewnętrzna zbudowana była z tlenku aluminium stanowiącego warstwę barierową dla przepływu ciepła. Poniżej strefy zewnętrznej, na granicy z podłożem, otrzymano strefę przejściową NiAl stanowiącą dyfuzyjne połączenie pomiędzy barierą warstwową Al_2O_3 a materiałem podłoża. Na granicy z podłożem występują wydzielienia zawierające podwyższoną koncentrację chromu, molibdenu, tytanu oraz wolframu. Otrzymane pokrycie charakteryzuje się bardzo dobrą odpornością na cykliczne zmiany temperatury, bardzo dobrą przyczepnością do podłoża oraz powoduje korzystne obniżenie temperatury powierzchni materiału łopatki.

P r z y k ł a d IV. Łopatkę turbiny wykonaną metodą odlewania ze stopu na bazie niklu o składzie chemicznym /w % wagowych/: Ni-osnowa; 10,2Cr; 5,3Al; 2,8Ti; 3,7Mo; 5,2W; 4,7Co; 0,14C; z wewnętrznymi kanałami chłodzącymi poddano natryskiwaniu cieplnemu przy pomocy pistoletu plazmowego tlenkiem aluminium, zawierającym 6% wagowych tlenku tytanu, poddanym uprzednio niklowaniu. Łopatka z tak otrzymaną warstwą tlenku poddana została następnie dyfuzyjnemu procesowi chromoaluminowania w temperaturze 1323 K. Na powierzchni łopatki otrzymano pokrycie

$Al_2O_3 \times TiO_2$ połączone z podłożem dyfuzyjną warstwą NiAl, o bardzo dużej przyczepności niemożliwej do otrzymania innymi metodami. Pokrycie spełnia dwa zasadnicze cele - warstwa zewnętrzna tlenków stanowi barierę cieplną obniżającą temperaturę materiału łopatkki oraz zapewnia bardzo wysoką odporność na gwałtowne zmiany temperatury i korozję wysokotemperaturową. W kanałach chłodzących łopatkki otrzymano warstwę dyfuzyjną składającą się z zewnętrznej strefy NiAl oraz przejściowej z wydzieleniami wzbogaconymi w wolfram, molibden, tytan i chrom. Otrzymane pokrycie doskonale chroni powierzchnię zewnętrzną oraz kanały chłodzące łopatkki przed korozją wysokotemperaturową w środowisku związków siarki oraz w warunkach cyklicznych zmian temperatury.

P r z y k ł a d V. Komora spalania silnika lotniczego wykonana ze stopu żarowytrzymałego HN70T pokryta została warstwą ceramiczną $ZrO_2 \times 8\%Y_2O_3$ otrzymaną przez natryskiwanie cieplne przy pomocy urządzenia HVOF /high velocity oxy fuel spraying/. Przed natryskiwaniem proszek poddano niklowaniu. Następnie powierzchnia komory spalania z natryskaną warstwą ceramiczną poddana została dyfuzyjnemu chromoaluminium w temperaturze 1353 K. Otrzymane pokrycie składa się z trzech stref. Pierwsza z nich od powierzchni to strefa ceramiki $ZrO_2 \times Y_2O_3$ decydująca o obniżeniu temperatury materiału podłoża - stanowiąca barierę cieplną. Następna, środkowa stanowi dyfuzyjne połączenie pomiędzy strefą zewnętrzną a materiałem podłoża. W strefie tej na granicy z podłożem wyróżnić można trzecią strefę z wydłużonymi, prostopadłymi do powierzchni wydzieleniami. Otrzymana struktura warstwy zapewnia wysoką odporność na korozję, odporność na cykliczne zmiany temperatury oraz bardzo dobrą przyczepność do podłoża. Komora spalania uzyskała zespół własności niemożliwy do uzyskania znanymi metodami.

P r z y k ł a d VI. Zawór silnika spalinowego pokryty został warstwą niklu metodą galwaniczną, po czym jego powierzchnia czołowa pokryta została warstwą ceramiczną tlenku cyrkonu zawierającego 8% tlenku itru. Proszek tlenku $ZrO_2 \times Y_2O_3$ przed natryskiwaniem pokryty został warstwą niklu metodą galwaniczną. Zawór z tak wytworzonym pokryciem poddano procesowi dyfuzyjnego chromoaluminium w temperaturze 1323 K. Otrzymano pokrycie stanowiące barierę cieplną odporną na korozję w gazach spalinowych oraz odporną na cykliczne zmiany temperatury o bardzo dobrej przyczepności do podłoża niemożliwej do osiągnięcia innymi metodami.

P r z y k ł a d VII. Powierzchnia górna tłoka silnika spalinowego wykonanego ze stopu żelaza pokryta została warstwą niklu metodą galwaniczną, a następnie poddana natryskiwaniu cieplnemu proszkiem tlenku aluminium zawierającym 6% wagowych tlenku tytanu. Proszek przed natryskiwaniem pokrywany warstwą niklu. Natryskiwanie cieplne prowadzono przy pomocy urządzenia plazmowego. Po procesie natryskiwania otrzymaną warstwą ceramiczną poddano procesowi dyfuzyjnego nasycania metodą kontaktowo-gazową w mieszaninie zawierającej proszek stopowy niklu i aluminium. Na powierzchni tłoka otrzymano pokrycie składające się z dwóch stref: zewnętrznej ceramicznej oraz dyfuzyjnej występującej pomiędzy strefą zewnętrzną i podłożem. Otrzymane pokrycie na powierzchni tłoka stanowi barierę cieplną o bardzo małej przewodności cieplnej oraz bardzo wysokiej przyczepności do podłoża, odporne na oddziaływanie gazów spalinowych, zwiększające własności eksploatacyjne.