

Adam GIEREK, Lucjan SWADŹBA,
Bolesław FORMANEK, Andrzej KOWALSKI

Instytut Inżynierii Materiałowej

BADANIA NAD DYFUZYJNYM ALUMINIOWANIEM ŻAROWYTRZYMAŁYCH STOPÓW NA ELEMENTY TURBIN GAZOWYCH

Streszczenie. W artykule przedstawiono problem podwyższenia odporności korozyjnej żarowytrzymałych stopów niklu używanych na łopatki kierujące i robocze lotniczych turbin gazowych. Opisano technologię dyfuzyjnego aluminowania w proszkach z zastosowaniem aktywatorów. Określono doświadczalnie zależność grubości warstw dyfuzyjnych od temperatury aluminowania. Przedstawiono wyniki badań struktury i mikrotwardości otrzymanych warstw na stopach EJ867, EJ437b i ŻS6K.

Za pomocą mikroanalizy rentgenowej określono rozkład pierwiastków w warstwie oraz ilościową zawartość pierwiastków w różnych punktach na przekroju warstwy.

1. Wprowadzenie

Podniesienie trwałości elementów turbin gazowych, zarówno przemysłowych jak i lotniczych, stało się w ostatnim 20-leciu bardzo ważnym problemem, przy czym szczególną uwagę zwraca się na te elementy, które pracują w najcięższych warunkach, tj. w wysokich temperaturach przy znacznych obciążeniach mechanicznych. Są to przede wszystkim łopatki kierujące i robocze, stanowiące jedno z najbardziej odpowiedzialnych ogniw turbiny. Od nich zależy bezawaryjność eksploatacji turbin przemysłowych i silników lotniczych. Stały się one dlatego głównym punktem zainteresowania zarówno konstruktorów jak i technologów.

Na łopatki turbin używa się obecnie w świecie najbardziej żarowytrzymałych stopów, głównie nadstopów na bazie niklu i kobaltu oraz w mniejszym zakresie molibdenu, niobu, tantalu, wolframu i innych trudno topliwych metali i stopów. Struktura tych stopów jest bardzo złożona, ponieważ muszą one łączyć w sobie wysokie własności wytrzymałościowe z wysoką odpornością na korozję w podwyższonych temperaturach. O ile wysokie własności wytrzymałościowe nadstopów można osiągnąć m.in. przez wprowadzenie do nich odpowiednich dodatków stopowych i odpowiednie zabiegi technologiczne, o tyle podwyższenie odporności na korozję wymaga dość skomplikowanych zabiegów, gdyż wzrost własności mechanicznych jest możliwy do osiągnięcia m.in. poprzez obniżenie w nich zawartości chromu. Problem ochrony żarowy-

trzymałych stopów przed korozją wysokotemperaturową nie stracił więc na ważności; skład chemiczny stopów bowiem, przy uwzględnieniu wytrzymałości na pełzanie, może być więc zmieniany jedynie w wąskich granicach. Nowe możliwości w tym względzie przynoszą nowe techniki wytwarzania, a w tym kierunkowa krystalizacja i metalurgia proszków.

Temperatura pracy, dla której przeznaczone są poszczególne stopy, zależy od konkretnego zastosowania. I tak np. w turbinach przemysłowych łopatki nie muszą być chłodzone, gdyż temperatura woltowa gazu wynosi ok. 750°C . W silnikach lotniczych natomiast temperatura na wlocie może wynosić 1250°C i dlatego w tym przypadku łopatki muszą być intensywnie chłodzone po to, aby temperatura kontaktu gazu z powierzchnią łopatki nie była wyższa niż $930-980^{\circ}\text{C}$.

Atmosfera w turbinie jest prawie zawsze wysoko utleniająca (dokładny skład gazów zależy od warunków otoczenia) i dla każdego silnika może się zmieniać w zależności od cyklu pracy silnika, a więc w czasie startu i lądowania turbinowy silnik lotniczy zużywa najwięcej paliwa, a podczas przelotu pracuje z nadmiarem powietrza. Przyspieszony atak korozyjny spowodowany jest obecnością określonych zanieczyszczeń w paliwie i dlatego turbiny lotnicze pracują na paliwach destylowanych. Atak ten spowodowany jest składem zaczerpniętego powietrza, przy czym ważnym źródłem zanieczyszczeń jest, np. sól morską wchłaniana z powietrzem. Pod wpływem produktów spalania paliwa, zawierających parę wodną, związki siarki, tlen, a także produkty niezupełnego spalania paliwa oraz tlenki metali zachodzą zmiany w składzie chemicznym, strukturze i własnościach fizykomechanicznych powierzchniowej warstwy łopatek.

Dla podwyższenia odporności korozyjnej łopatek turbin gazowych w ostatnich latach zaczęto je poddawać obróbkom technologicznym mającym na celu wytworzenie dyfuzyjnych warstw aluminiowych, chromowych oraz kompleksowych warstw typu Cr+Al, Al+Si lub bardziej złożonych, np. Ta+Cr+Al, Pt+Al itp. Warstwy chromowe znalazły zastosowanie w odniesieniu do łopatek turbin stacjonarnych, których temperatura pracy nie przekracza 800°C , a których środowisko pracy jest niezwykle agresywne, gdyż do napędu stosuje się paliwa najgorszej jakości, zawierające obok bardzo agresywnych związków siarki potęgujący agresywne działanie korozyjne - pięciotlenek wanadu V_2O_5 . Powyżej temperatury 900°C (w silnikach lotniczych) ze względu na niebezpieczeństwo parowania CrO_3 sam chrom jako zabezpieczenie przed korozją nie znalazł zastosowania. Dlatego też najbardziej rozpowszechnionym typem pokrycia są dyfuzyjne warstwy Al lub Cr+Al, pokrywające się podczas utleniania zgorzeliną Al_2O_3 .

Z zebranego dotychczas materiału literaturowego dotyczącego zastosowania stopów żarowytrzymałych można wnioskować, że równocześnie z dalszym rozwojem tych stopów, a właściwie z ich ulepszaniem, niezbędny będzie dalszy rozwój technologii wytwarzania powłok ochronnych. Wymagania stawiane powłokom ochronnym są w stosunku do tworzywa rdzennego następujące [3]:

- wysza odporność na utlenianie i korozję, co wpłynie z jednej strony na przedłużenie żywotności elementów, a z drugiej - na możliwość podniesienia temperatury pracy elementów,
- lepsza wytrzymałość na erozję,
- większa plastyczność,
- możliwość regeneracji bez zmian wymiarowych łopatek.

Dotychczas nie udało się znaleźć takiego rodzaju powłok, który dostatecznie spełniałby wszystkie przedstawione wyżej wymagania. Dlatego też przewiduje się dalszy ich rozwój, który być może nie doprowadzi od razu do pełnego sukcesu, ale pozwoli na znaczne zbliżenie własności powłok do wymagań.

Jednym z czynników, który wpłynie na ukierunkowanie badań nad dyfuzyjnymi powłokami na stopy żarowytrzymałe na bazie niklu, będzie dalsze doskonalenie metod badawczych. Dokładne poznanie struktury warstw, rodzaju występujących w nich faz, a także ich wzrostu oraz przemian zachodzących podczas eksploatacji pozwoli na optymalizację technologii wytwarzania znanych i stosowanych obecnie powłok ochronnych, jak również na ukierunkowanie dalszych badań nad rodzajami powłok, które poznano dotychczas w niewielkim stopniu.

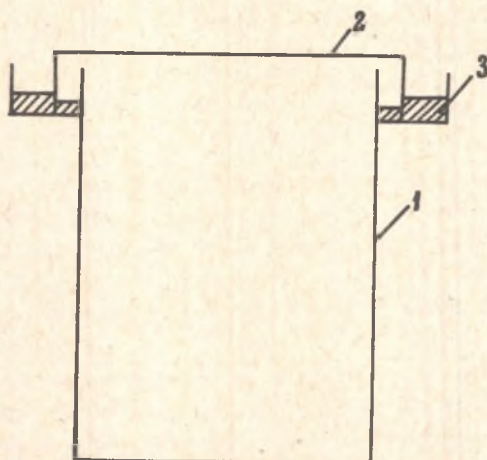
Celem niniejszej pracy jest przedstawienie niektórych wyników badań prowadzonych w ramach problemu I-22 w Instytucie Inżynierii Materiałowej Politechniki Śląskiej nad technologią wytwarzania i niektórymi własnościami dyfuzyjnych warstw aluminiowych, uzyskiwanych na wybranych żarowytrzymałych stopach niklu.

2. Badania własne

2.1. Technologia otrzymywania dyfuzyjnych warstw aluminiowych

W niniejszych badaniach do wytwarzania dyfuzyjnych warstw aluminiowych na żarowytrzymałych stopach niklu zastosowaliśmy metodę proszkową. Wybór tej metody podyktowany został prostotą oprzyrządowania, niskim kosztem zużywanych surowców oraz dużą powtarzalnością wyników, którą stwierdziliśmy w badaniach wstępnych. Źródło pierwiastka nasycającego stanowił proszek żelazo-aluminium o zawartości ok. 50% Al. Wypełniaczem był inertyny proszek tlenku glinu, a aktywatorem procesu chlorek amonowy NH_4Cl . Udział procentowy poszczególnych składników w mieszaninie nasycającej był następujący: FeAl - 40%, Al_2O_3 - 60%. Chlorek amonowy dodawano w ilości 0,5-1% w stosunku do całkowitego ciężaru mieszaniny. Po odpowiednim przygotowaniu poszczególne składniki dokładnie wymieszano.

Proces dyfuzyjnego nasycania prowadzono w kontenerze wykonanym z blachy żaroodpornej. Schemat kontenera przedstawia rys. 1. Aby zapobiec przedostawaniu się powietrza z przestrzeni pieca do wnętrza kontenera, co mogłoby doprowadzić do utleniania mieszaniny oraz próbek w temperaturze pro-



Rys. 1. Schemat kontenera do dyfuzyjnego aluminowania w proszkach
1 - kontener; 2 - pokrycie; 3 - uszczelnienie

cesu, zastosowano tzw. topliwe uszczelnienie, którym było szkło ołowiane o temperaturze topnienia nie przekraczającej 750°C . Tak więc, gdy w temperaturze 350°C NH_4Cl rozkłada się na NH_3 i HCl z wytworzeniem dużej ilości gazu, który wypiera powietrze z przestrzeni międzyciastkowej mieszaniny szkło występuje jeszcze w stanie stałym i nie stanowi przeszkody dla wychodzących z kontenera gazów. Po pewnym czasie szkło zaczyna się topić, nie dopuszczając ani do wydostawania się gazów z kontenera, ani też dostawania się powietrza do jego wnętrza. W kontenerze ustala się wówczas stałe ciśnienie aktywnej mieszaniny gazów powstałej z reakcji aktywatora z proszkiem żelazo-aluminium.

Praktycznie więc przygotowanie kontenera do pracy polegało na tym, że najpierw wsypano doń warstwę proszku, na której układano próbki ze stopów poddawanych obróbce, przy czym celem uzyskania jednakowych warunków prowadzenia procesu próbki te rozmieszczano w równej odległości od ścianek bocznych. Następnie, po uzupełnieniu mieszaniną nasycającą, kontener przykryto, a pokrycie obsypano równomierną warstwą sproszkowanego szkła ołowianego. Przygotowane w ten sposób kontenery wkładano do pieca silitowego nagrzanego do temperatury procesu.

Proces dyfuzyjnego nasycania prowadzono w temperaturach 900, 950 i 1000°C w czasie 6 godzin, po czym kontener z próbkami wyjmowano z pieca i chłodzono na powietrzu. Po ostygnięciu do temperatury ok. 100°C kontener otwierano, a próbki poddawane były wygotowaniu w wodzie w celu usunięcia z ich powierzchni resztek mieszaniny nasycającej.

2.2. Dobór stopów do badań i przygotowanie próbek

Do badań przeznaczono stopy żarowytrzymałe EJ437b, EJ867 i ZS6K - tablica 1. Wybór stopów EJ867 i ZS6K podyktowany został tym, że pier-

Tablica 1

Skład chemiczny żarowytrzymałych stopów użytych do badań

Stop Pierwiastek	EJ437b	EJ 867	ZS6K
Cr	19,0 ÷ 22,0	8,5 ÷ 10,5	9,5 ÷ 12,0
Al	0,6 ÷ 1,0	4,2 ÷ 4,9	5,0 ÷ 6,0
Ti	2,4 ÷ 2,8	—	2,5 ÷ 3,5
Mo	—	9,0 ÷ 12,0	3,5 ÷ 4,5
W	—	4,3 ÷ 6,0	4,0 ÷ 5,5
Co	—	4,0 ÷ 6,0	4,0 ÷ 5,5
Zr	—	—	0,04
B	0,003 ÷ 0,01	max 0,02	0,02
Ce	0,02	max 0,02	0,025
Si	max 0,6	max 0,6	max 0,4
Mn	max 0,4	max 0,3	max 0,4
S	max 0,07	max 0,11	max 0,15
P	max 0,15	max 0,15	max 0,15
Pb	max 0,001	—	0,001
Bi	—	—	0,0005
C	0,07	0,10	0,20 ÷ 0,13
Ni	reszta	reszta	reszta

wszy z nich stosowany jest na robocze łopatki silnika lotniczego; jest to stop przeznaczony do przeróbki plastycznej. Stop ZS6K jest stopem odlewniczym używanym na łopatki kierujące silników lotniczych. Obydwa te stopy w warunkach pracy są więc narażone na działanie bardzo wysokich obciążeń temperaturowych i mechanicznych. W związku z tym ich ochrona przed korozją posiada pierwszorzędne znaczenie. Stop EJ437b jest stopem przeznaczonym do kucia. Jest to stop odbiegający znacznie składem chemicznym od pozostałych dwóch. Jest on również używany na łopatki turbin lotniczych^{x)}.

^{x)} Ze względu na to, że temperatura dyfuzyjnego nasycania stopu EJ437b znacznie przekracza temperaturę starzenia, wyniki dyfuzyjnego nasycania służą jedynie dla porównania struktury uzyskanej warstwy oraz niektórych jej własności z pozostałymi dwoma stopami. Opracowanie natomiast konkretnej technologii dyfuzyjnego aluminiowania tego stopu jest nieco bardziej skomplikowane i nie zostanie w tej pracy opisane.

Przed przeprowadzeniem powierzchniowej obróbki dyfuzyjnej wszystkie trzy rodzaje stopów poddano obróbce cieplnej - zgodnie z wymogami technologicznymi obróbki cieplnej, która dla nich została przewidziana. Obróbka cieplna stopu EJ437b polega na przesycaaniu w temperaturze 1080°C w czasie 8 godzin oraz starzeniu w temperaturze 700°C w czasie 16 godzin. W przypadku stopu ZS6K technologia obróbki cieplnej przewiduje wygrzanie w temperaturze 1200 ± 20 w czasie 4 godzin i chłodzenie na powietrzu. Natomiast w przypadku stopu EJ867 parametry obróbki cieplnej są następujące: przesycaanie w temperaturze 1200 ± 10°C w czasie 4-6 godzin, starzenie w temperaturze 950 ± 15°C w czasie 8 godzin.

Próbki ze stopu ZS6K wykonano w postaci wałków o średnicy 10 mm i długości 30 mm, natomiast próbki ze stopów EJ437b i EJ867 wykonano w postaci krążków o średnicy 20 mm i grubości ok. 5 mm. Krążki te szlifowano następnie na papierach ściernych o gradacji od 320 do 600. Chodziło o uzyskanie odpowiedniej gładkości powierzchni, od której zależy z jednej strony równomierność pokrycia, z drugiej zaś gładkość powierzchni po procesie dyfuzyjnego aluminowania. Bezpośrednio przed procesem dyfuzyjnego nasycania krążki te odtłuszczano w trójchloroetylenie.

2.3. Badania próbek po procesie dyfuzyjnego nasycania

Obserwacje metalograficzne struktury oraz pomiaru grubości warstw dyfuzyjnych dokonano przy użyciu mikroskopu firmy Reichert typu MeF-2. Zmierzona grubość warstwy stanowiła średnią z sześciu pomiarów w różnych miejscach zglądu metalograficznego. Pomiar mikrotwardości prowadzono metodą Knoppa (μHK) za pomocą specjalnej przystawki do mikroskopu metalograficznego firmy Reichert MeF-2 przy obciążeniu 25 (g). Dla wybranych próbek przeprowadzono pomiar rozkładu mikrotwardości do grubości warstwy, dla innych mierzono mikrotwardość tylko w środkowej części warstwy zewnętrznej i przejściowej.

Rozkład podstawowych pierwiastków (Ni, Al, Co, W, Mo, Cr) w pokryciu i podłożu określano za pomocą mikroanalizatora rentgenowskiego IXA-50A firmy JEOL przy napięciu przyspieszającym 25 kV i średnicy wiązki utrzymywanej w granicach 1 μm . Dokonano również analizy ilościowej w wybranym obszarze próbki na przekroju warstwy.

Otrzymane ilości wagowe każdego pierwiastka skorygowano następnie ze względu na efekty fluorescencji i absorpcji. Określono również wstępnie skład fazowy powierzchni próbek poddanych dyfuzyjnemu aluminowaniu. Oznaczenia te wykonano przy pomocy dyfraktometru rentgenowskiego IDX-7S firmy JEOL.

2.4. Wyniki badań

Proszkowa metoda dyfuzyjnego aluminowania w zakresie wszystkich trzech przebadanych temperatur 900, 950 i 1000°C oraz dla szerokiego zakresu stę-

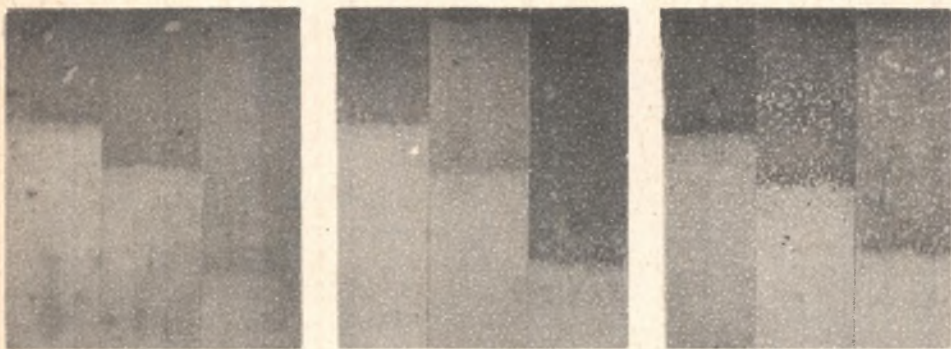
zeń proszku pierwiastka nasycającego od 30 do 100% FeAl pozwoliła na uzyskanie warstw wierzchnich o znacznej gładkości. Zaletą stosowania sproszkowanego żelazoaluminium jako źródła Al jest jego niespiekanie się w temperaturze procesu, a ponadto to, że może on być stosowany w bardzo szerokim zakresie granulacji, bez zasadniczego wpływu na końcowe rezultaty procesu aluminowania.

Chlorek amonowy może być dodawany do mieszanin w ilości od 0,5 do 2,5%. Ze względu na agresywne działanie punktów jego rozkładu na oprzyrządowanie pieców, dąży się zwykle do zmniejszenia jego ilości. Wyniki badań wykazały, że aktywator nie musi być - jak to najczęściej ma miejsce - dodawany równomiernie do mieszaniny, gdyż można go wsypywać w całości na cienką warstwę mieszaniny na dnie kontenera.

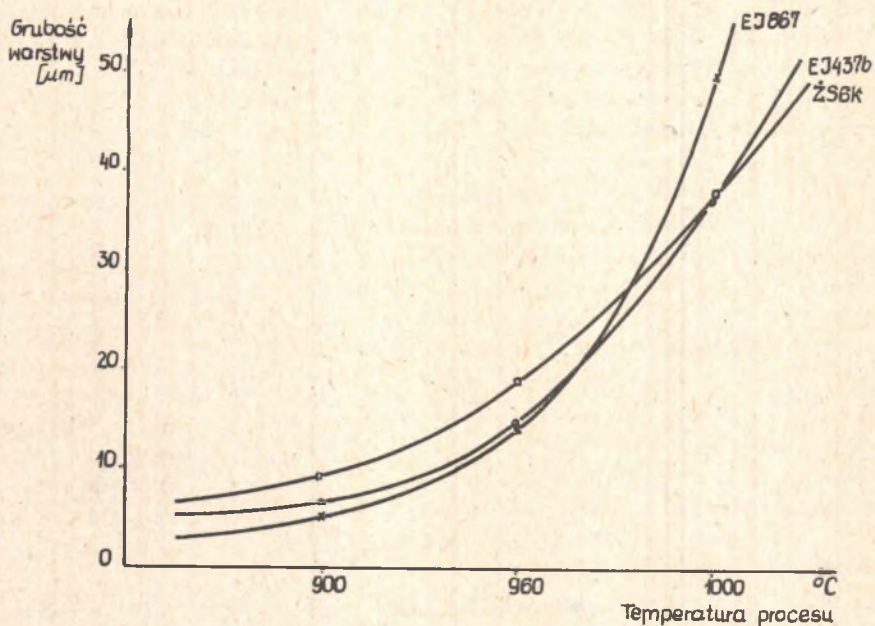
Duży wpływ na rezultaty dyfuzyjnego nasycania z technologicznego punktu widzenia posiada rodzaj i grubość warstwy uszczelniającej. Szkło ołowiowe okazało się w tym wypadku bardzo przydatne, przy założeniu jednak, że jego warstwa po stopieniu nie przekracza 3-5 mm. I choć zwiększenie grubości warstwy szkła zmniejsza, rzecz jasna, niebezpieczeństwo utleniania się mieszaniny i próbek, to jednakże otwarcie kontenerów w tym wypadku staje się utrudnione.

Warunki technologiczne wytwarzania warstw dyfuzyjnych należy każdorazowo dobrać (lub w najlepszym wypadku sprawdzić) dla konkretnej wielkości kontenera oraz pojemności cieplnej pieca, gdyż od tych wielkości zależy jest czas prowadzenia procesu, a więc i grubość warstwy dyfuzyjnej.

Przykładowo wpływ temperatury na grubość badanych warstw dyfuzyjnych przedstawiają rys. 2 i 3. Ponieważ praktycznie jednak zakres temperatury



Rys. 2. Mikrofotografia zmian grubości warstwy dyfuzyjnej na stopach
a - EJ437b; b - EJ867; c - ZS6K
Proces prowadzono w temperaturach 900, 950 i 1000°C w czasie 6 godzin.
Nietraw. Pow. 400x



Rys. 3. Wykres zmian grubości dyfuzyjnych warstw aluminiowych w zależności od temperatury procesu dyfuzyjnego nasycania



NiAl + wydzielenia bogate
w W, M_o, C_r

Ni₃Al + NiAl + obszary bogate
w W, C_r, M_o

γ + γ' (podłoże)

Rys. 4. Mikrografia dyfuzyjnej warstwy aluminiowej na stopie EJ867
Nietraw. Pow. 400x

aluminiowania nie może przekroczyć temperatury starzenia stosowanych nadstopów, jedynym więc parametrem, który w tym przypadku można zmienić jest czas dyfuzyjnego nasycania.

2.5. Struktura warstw dyfuzyjnych

Strukturę dyfuzyjnej powłoki aluminiowej uzyskanej na żerowytrzymałym stopie EJ867 w temperaturze 1000°C w czasie 6 godzin przedstawiono na rys. 4.

Powłoka składa się z dwóch warstw - zewnętrznej oraz przejściowej pomiędzy warstwą zewnętrzną a podłożem. Warstwa zewnętrzna powłoki to faza β - NiAl o zmniejszającej się zawartości Al od 33,75 przy powierzchni do 26% wag. w środku jej warstwy. W fazie tej znajdują się drobnodyspersyjne wydzielenia, w których Fleetwood [1] stwierdził występowanie W, Cr i Mo. Pojawienie się tych wydzieleni w warstwie tłumaczy on małą rozpuszczalnością pierwiastków trudno topliwych w fazie NiAl. Dowodem na to ma służyć fakt, że przy wyższych temperaturach procesu, np. 1000°C lub 1050°C cząstek tych jest nieco mniej niż w temperaturze 900 lub 950°C , co może świadczyć o zwiększonej ze wzrostem temperatury rozpuszczalności pierwiastków trudno topliwych w fazie NiAl. Między warstwą NiAl a stopem podstawowym stwierdza on warstwę przejściową o charakterystycznej budowie słupkowej. Autor omawianej pracy sugeruje, że są to słupkowe wydzielenia faz NiAl lub Ni_3Al , rozdzielone osnową bogatą w pierwiastki trudno topliwe.

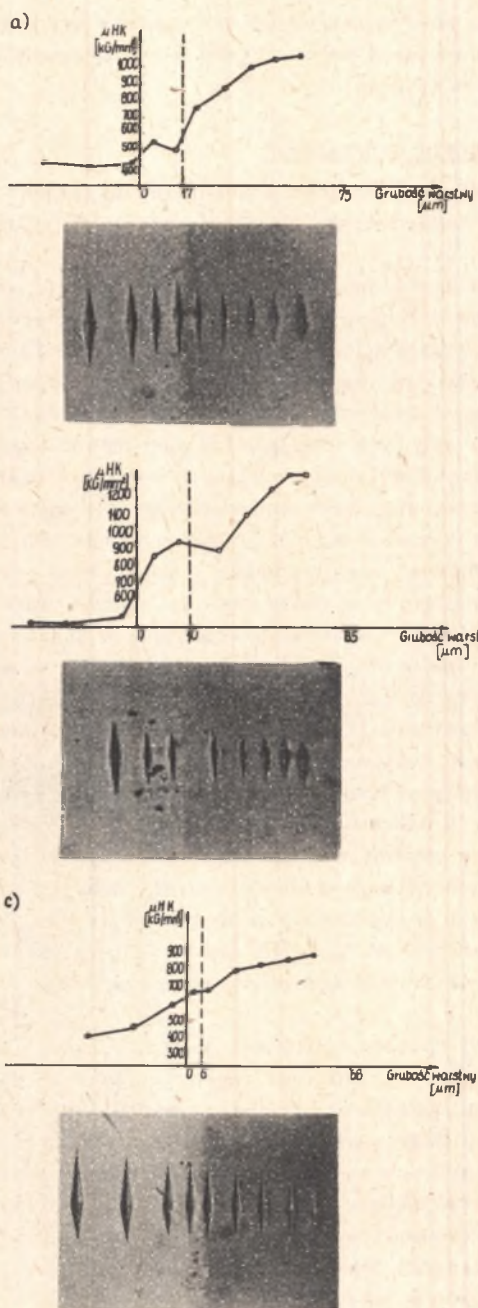
Goward i współautorzy [2] doszli do wniosku, że faza bogata w wolfram zawiera pewną ilość rozpuszczonego chromu.

Badania rentgenograficzne przeprowadzone w niniejszej pracy wykazały, że Cr występuje w postaci cząstek roztworu stałego, nie dowiedziono natomiast w niezbity sposób występowania W w tym roztworze.

Na rys. 6b-g przedstawiono rentgenowski rozkład pierwiastków w warstwie zewnętrznej i przejściowej powłoki dyfuzyjnej. Charakterystyczna jest duża i stosunkowo równomierna zawartość Al w warstwie zewnętrznej, która maleje wraz z przejściem od warstwy zewnętrznej do warstwy przejściowej.

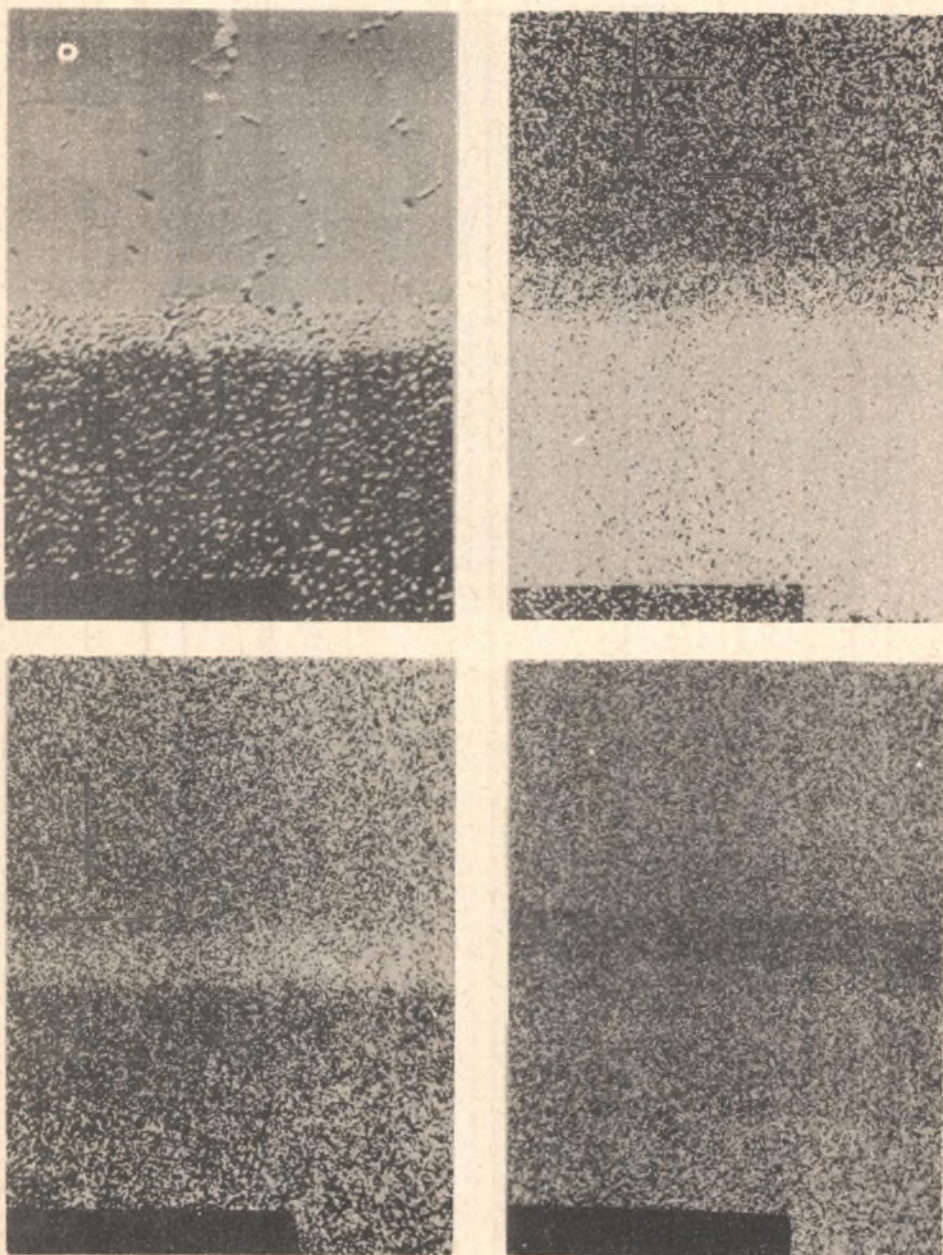
W tej ostatniej charakterystyczny jest natomiast gwałtowny wzrost koncentracji pierwiastków trudno topliwych, w tym w stopie EJ867 m.in. W, Mo i Cr, jak również dodatkowo Ti w przypadku stopu EJ437b oraz odlewniczego stopu ZS6K. Równoczesny znaczny wzrost zawartości węgla w warstwie przejściowej stwierdzony za pomocą mikroanalizatora rentgenowskiego w podłożu, warstwie przejściowej i zewnętrznej sugeruje występowanie węglików w warstwie przejściowej oraz w obszarze graniczącym z warstwą zewnętrzną. Potwierdzają to badania Gowarda i współautorów [2], którzy stwierdzili (stosowali odpowiednią metodę trawienia) występowanie w tym obszarze mieszaniny węglików typu MC, M_{23}C_6 oraz M_6C .

Wyniki analizy ilościowej pierwiastków w warstwie dyfuzyjnej na stopie EJ867 przedstawiono w tabelicy 2.



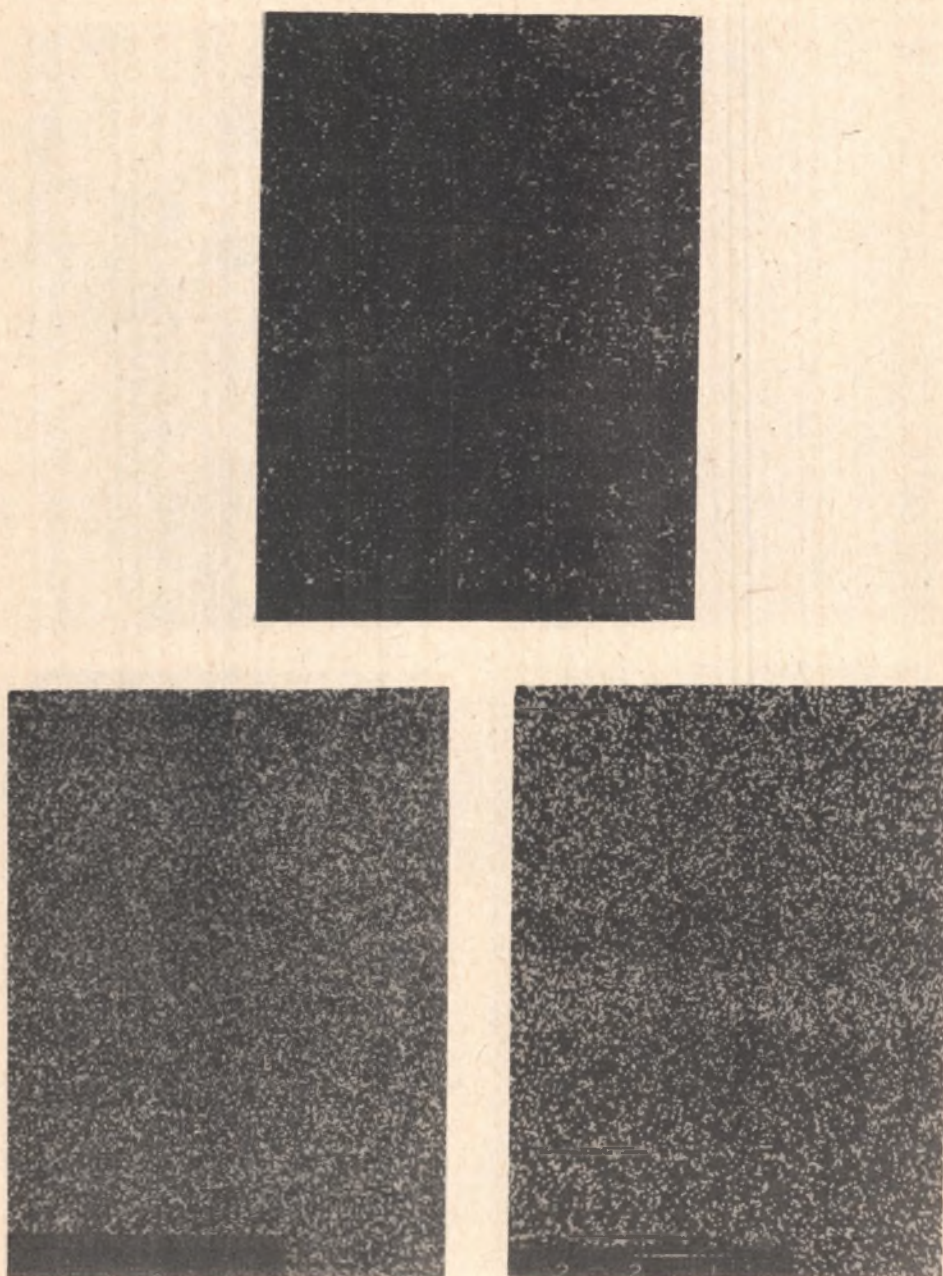
Rys. 5. Rozkład mikrotwardości na przekroju dyfuzyjnej warstwy aluminiowej na stopach

a - EJ437b; b - EJ867; c - ZS6K



Rys. 6. Powierzchniowy rozkład koncentracji pierwiastków w dyfuzyjnej warstwie aluminiowej otrzymanej na stopie E3857

a - zdjęcie kompozycyjne powierzchni zglądu; b - rozkład koncentracji Al;
c - rozkład koncentracji Cr; d - rozkład koncentracji Ni



Rys. 6. Powierzchniowy rozkład koncentracji pierwiastków w dyfuzyjnej warstwie aluminiowej otrzymanej na stopie EJ867

e - rozkład koncentracji Mo; f - rozkład koncentracji W; g - rozkład koncentracji Co
Pow. 1000x

Tablica 2

Wyniki ilościowej analizy pierwiastków
w różnych miejscach przekroju poprzecznego powłoki dyfuzyjnej

<i>Pierwiastek</i> <i>Miejsce pomiaru</i>	<i>Al</i>	<i>Cr</i>	<i>Ni</i>	<i>Co</i>	<i>Mo</i>	<i>W</i>
<i>Podłoże</i>	3,98	14,79	55,33	7,11	11,36	7,33
<i>Warstwa przejściowa</i>	3,75	19,15	49,88	4,79	10,31	11,99
	11,09	21,35	41,94	5,39	16,93	3,38
<i>Warstwa zewnętrzna</i>	26,18	8,94	38,56	4,58	15,65	5,98
	33,75	7,83	41,38	5,59	6,82	4,51

Na podstawie zebranego dotychczas materiału doświadczalnego nie można jeszcze przedstawić pełnego mechanizmu powstawania słupkowych faz w warstwie przejściowej. Można jedynie stwierdzić duży wpływ temperatury dyfuzyjnego nasycania na wielkość tych wydzieleni.

Przeprowadzone badania wstępne nad określeniem kierunku wzrostu warstwy, a więc pośrednio i kierunku dyfuzji aluminium i pierwiastków podłoża, wykazały, że zarówno w przypadku nasycania w mieszaninach bardzo "aktywnych" jak i "mało aktywnych" powłoka dyfuzyjna rośnie na zewnątrz wskutek dyfuzji pierwiastków (głównie Ni) z podłoża oraz Al do podłoża. Należałoby ustalić wpływ temperatury na kierunek wzrostu warstw. Być może, że będzie ona miała nie mniejszy wpływ jak "aktywność" mieszaniny.

Na rys. 5a, b i c przedstawiono wyniki pomiarów mikrotwardości dyfuzyjnych warstw aluminowych na stopach EJ437, EJ867 i ZS6K. Przebieg zmian mikrotwardości na szerokości warstw dla tych stopów posiada podobny charakter, zaś różnice dotyczą jedynie ich wartości. Najwyższą wartość mikrotwardości stwierdzono mianowicie na zewnątrz warstwy i wynosiła ona dla stopów EJ437b, EJ867 i ZS6K odpowiednio: 1080 kg/mm²; 1280 kg/mm² i 860 kg/mm². Należy zaznaczyć, że próbki po procesie nasycania dyfuzyjnego nie były dodatkowo obrabiane cieplnie. Wyżarzanie próbek z naniesionymi warstwami w temperaturze 950°C przez okres 4-6 godzin powoduje spadek mikrotwardości.

3. Podsumowanie

Przeprowadzone w niniejszej pracy badania pozwoliły na opracowanie stosunkowo prostego sposobu nanoszenia powłok aluminiowych. Określono także niektóre własności uzyskanych powłok. Stwierdzono, że sposób ten pozwala wytwarzać szczelne dyfuzyjne powłoki aluminiowe, nie różniące się strukturą od powłok wytwarzanych wg technologii aktualnie stosowanej w przemyśle, na wszystkich badanych żarowytrzymałych stopach Ni.

Następnym etapem badań będzie więc określenie właściwości użytkowych powłok przy cyklicznie zmieniającej się temperaturze oraz powiązanie tych właściwości z optymalną grubością warstwy, przy uwzględnieniu maksymalnych własności mechanicznych pokrytego wyrobu.

LITERATURA

- [1] Fleetwood M.J.: Journal of the Institute of Metals 1970, vol. 98, s. 1-7.
- [2] Goward G.W., Boone D.H., Giggins C.S.: Transactions of the ASM v. 60, 1967, s. 228-247.
- [3] Lechnert G.H., Meinhard W.: DEW - Technische Berichte 11 Band, 1971, Heft 4.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФФУЗИОННОГО АЛИТИРОВАНИЯ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ АВИАЦИОННЫХ ТУРБИН

Р е з ю м е

Предложена проблема повышения коррозионной стойкости жаропрочных никелевых сплавов, применяемых для лопаток авиационных турбин. Описан метод диффузионного алитирования в порошковых смесях с применением активаторов. Определена температурная зависимость роста диффузионного слоя. Предложены результаты испытаний структуры и микротвёрдости диффузионных слоев, полученных на сплавах ЕИ-867, КИ-4376 и ЖС6К.

Методом микровзонда определено распределение элементов в диффузионном слое, а также проведён количественный анализ элементов в различных точках слоя.

INVESTIGATIONS OF THE PACK ALUMINIZING PROCESS
OF CREEP RESISTING ALLOYS FOR GAS TURBINE APPLICATIONS

S u m m a r y

This study deals with the corrosion resistance increase problem of creep resisting nickel base alloys which are used for aircraft gas turbine blades. The pack cementation process for the formation of diffusion aluminate coatings has been described. Diffusion layer thickness aluminizing temperature relationship was experimentally determined. Microstructure examinations and microhardness tests results of the aluminate layers on EJ867, EJ437b, and ZS6K alloys have been reported. Concentration profiles and elements contents in different spots of the layer cross section were determined by electron probe microanalysis.