

Zygmunt RACZYŃSKI

Politechnika Rzeszowska

ALUMINIOWANIE ŻAROWYTRZYMAŁEGO STOPU EJ-437B NA OSNOWIE NIKLU

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki badań nad narastaniem metodą proszkową powłoki aluminiowej na stop EJ-437B. Wykazano, że aluminowanie w temperaturze 750°C w ciągu 25 godz. prowadzi do uzyskania warstwy grubości 20µm o wyraźnie zwiększonej żaroodporności.

Elementy turbinowego silnika odrzutowego, pracujące w wysokich temperaturach, narażone są na działanie czynnika roboczego, który z powietrzem i zanieczyszczeniami z atmosfery tworzy gazy o różnej, często dużej intensywności działania korozyjnego. Do korozyjnego działania gazów dochodzą występujące naprężenia, wywołane siłami zewnętrznymi i ciężarem własnym pracujących części. Najbardziej narażonymi elementami silnika na korozyjne działanie gazów i działanie naprężeń jest turbina oraz komora spalania.

W celu uzyskania wysokiego stopnia sprawności temperatura przed turbiną powinna być możliwie najwyższa. Spełnienie tego wymagania ograniczone jest jednak własnościami materiałów stosowanych na elementy robocze, pracujące w wysokich temperaturach. W turbinie gazowej głównymi częściami pracującymi w bardzo wysokich temperaturach są łopatki turbiny, łopatki kierownic i części komory spalania. Dobór i zastosowanie odpowiednich materiałów wiąże się z całym szeregiem zagadnień metalurgicznych.

Materiały stosowane do wykonywania elementów silników odrzutowych pracujących w wysokich temperaturach muszą spełniać wymagania i przenosić obciążenie określone warunkami ich pracy.

Do obciążeń tych i własności zaliczamy:

- obciążenie doraźne w normalnej i wysokiej temperaturze,
- obciążenie stałe w wysokich temperaturach,
- obciążenie zmienne w wysokich temperaturach,
- odporność na utlenianie się i korozję,
- własności fizyczne,
- własności technologiczne.

Zbadanie i określenie tych własności pozwala na właściwy dobór materiałów żaroodpornych i żarowytrzymałych, stosowanych w budowie silników.

Niejednokrotnie materiały cechujące się znaczną żarowytrzymałością nie mogą być stosowane powyżej pewnego zakresu temperatur pracy ze względu na

stosunkowo niską żaroodporność. Podwyższenie odporności warstwy wierzchniej tego rodzaju materiałów na utlenianie prowadzi do podwyższenia temperatury ich pracy. Dzięki temu uzyskuje się większą moc silnika i przedłuża okres jego eksploatacji.

Do znanych i stosowanych metod polepszania żaroodporności poprzez uodpornienie powierzchni stopów przeciw utlenianiu należą: pokrywanie żaroodpornymi emaliami, chromowanie, chromo-aluminiowanie i aluminiowanie dyfuzyjne a także stosowanie pokryć materiałami ceramicznymi. W przemyśle lotniczym znalazły głównie zastosowanie chromo-aluminiowanie i aluminiowanie dyfuzyjne [1, 2, 3].

Celem pracy było opracowanie procesu aluminiowania w temperaturze zbliżonej do temperatury starzenia żarowytrzymałego stopu EJ-437B. Zastosowano metodę proszkową z uwagi na jej prostotę a także otrzymywanie bardzo równomiernej grubości warstwy i gładkiej bez wad powierzchni. Stop EJ-437B nie charakteryzuje się zbyt wysoką żaroodpornością a ponieważ jest szeroko stosowany w konstrukcjach silników lotniczych do wytwarzania łopatek turbin, istniała konieczność przebadania możliwości jego aluminiowania a także wpływu tego procesu na własności mechaniczne stopu.

Do aluminiowania dyfuzyjnego stopu EJ-437B wybrano mieszaninę proszkową składającą się z 98% Fe-Al i 2% NH_4Cl . Skład chemiczny Fe-Al zamieszczono w tabeli 1, natomiast skład chemiczny badanego stopu w tabeli 2.

Tabela 1

Skład chemiczny Fe-Al

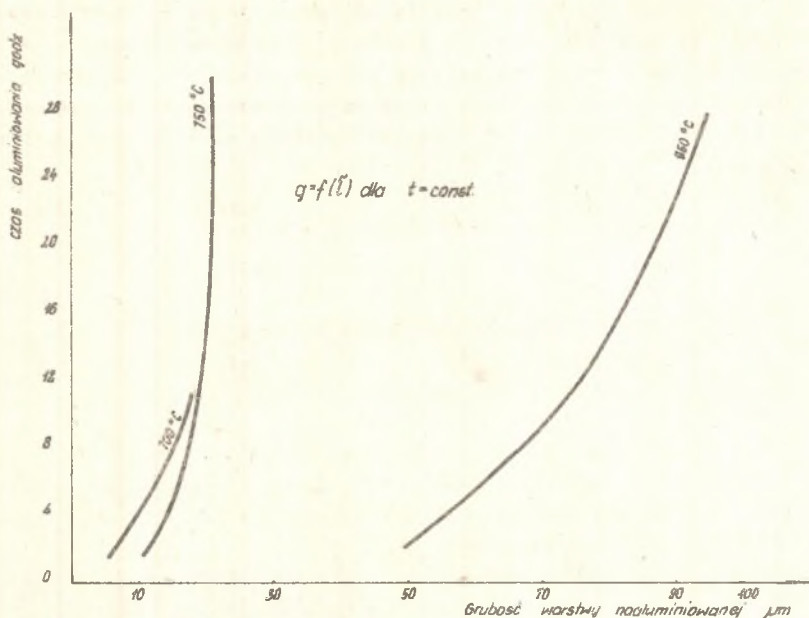
Składnik	Fe	Al	Mn	Cu	Si	Inne domieszki
Zawartość [%]	50	41	1	4	3	1

Tabela 2

Skład chemiczny stopu EJ-437B

Składnik	C	Mn	Si	Cr	Ti	Al	B	Fe	Ni
Zawartość [%]	0,08	0,4	0,6	21	2,4	0,70	0,005	2,4	Osnowa

Pierwszy etap obejmował badania wpływu czasu aluminiowania na grubość warstwy naaluminowanej ($g = f(\tau)$) przy $\tau = \text{const.}$ oraz badania wpływu temperatury na grubość warstwy naaluminowanej ($g = f(\tau)$) przy $\tau = \text{const.}$ Próby aluminiowania przeprowadzono na próbkach okrągłych o ϕ 20 i grubości 10 mm. Pręt, z którego wytoczono i wycięto próbki poddano przed procesem aluminiowania utwardzaniu dyspersyjnemu, składającemu się z przesyłania w temperaturze 1080°C, w czasie 8 godz., chłodzenia w powietrzu i studzenia w temperaturze 700°C w czasie 16 godz., chłodzenia w powietrzu. Przed załadowaniem do skrzynek z proszkową mieszaniną aluminiującą badane



Rys. 1. Zależność grubości warstwy naaluminowanej w funkcji czasu aluminowania w temperaturze 700°C, 750°C i 950°C

Tablica 3

Warunki obróbki ciepło-chemicznej próbek wykonanych ze stopu EJ-437B

Nazwa operacji	Temperatura załadowania [°C]	Czas dojścia do temp. aluminowania [godz.]	Temperatura aluminowania [°C]	Czas aluminowania [godz.]
Aluminiowanie	400	4	700	2,4,6,8,10
Aluminiowanie	400	4,5	750	2,4,6,8,10,15,20,25,30
Aluminiowanie	400	6,5	950	2,4,6,8,10,25

próbki oczyszczono mechanicznie drobnym papierem ściernym 400 i odtłuszczone przez umycie ich powierzchni w czystej benzynie. Następnie próbki załadowano do skrzynek z mieszaniną aluminującą. Proces aluminowania prowadzono w piecu PEK-O. Wpływ czasu trwania procesu aluminowania na grubość warstwy naaluminowanej zbadano w trzech zakresach temperatur: $t_1 = 700^{\circ}\text{C}$, $t_2 = 750^{\circ}\text{C}$ i $t_3 = 950^{\circ}\text{C}$.

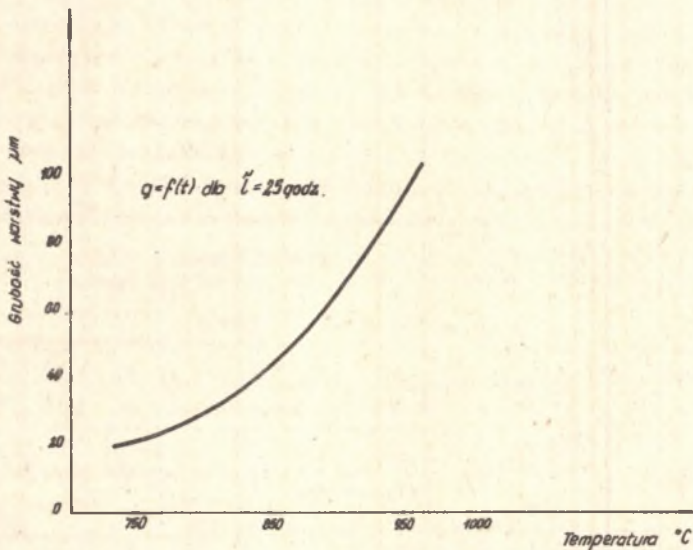
Po aluminowaniu wszystkie próbki wyżarzono w temperaturze 750°C w czasie 2 godz. Warunki obróbki ciepło-chemicznej próbek zamieszczono w tablicy 3. Pomiarów grubości warstw naaluminowanych dokonano na prostop-

dłych do powierzchni zglądach przy użyciu mikroskopu Epithyp - 2. Na rys. 1 pokazano zależność grubości warstwy naaluminowanej w funkcji czasu aluminowania w temp. 700°C i 950°C. Z analizy przebiegu krzywych z rys. 1 wynika, że wzrost czasu i temperatury procesu powoduje powiększanie się grubości warstwy naaluminowanej, przy czym w zakresie tego samego przedziału czasu przy wyższych temperaturach grubość warstwy naaluminowanej jest większa.

$$g t_3 > g t_2 > g t_1$$

gdzie:

$g t$ - grubość warstwy otrzymana w danej temperaturze.



Rys. 2. Wpływ temperatury aluminowania na grubość warstwy naaluminowanej w stopie EJ-437B

Natomiast ze wzrostem czasu aluminowania przy stałej temperaturze przyrost grubości warstwy wyraźnie maleje, a więc: dla

$$\tau_2 > \tau_1 \rightarrow \Delta g \tau_1 > \Delta g \tau_2$$

gdzie:

τ_1 i τ_2 - czasy aluminowania,

$\Delta g \tau_1$ - przyrost grubości warstwy naaluminowanej w kolejnych, równych odstępach czasu,

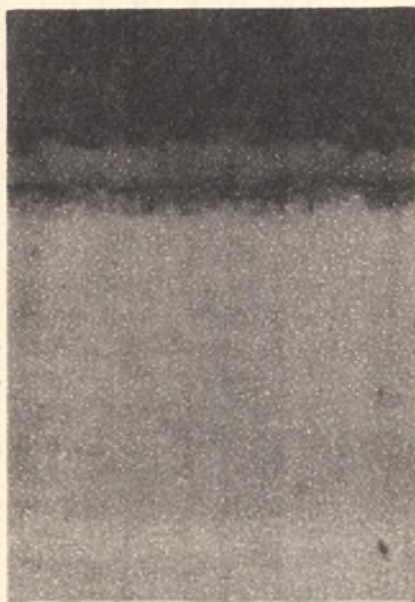
$\tau_1, \Delta g \tau_2$ - przyrost grubości warstwy naaluminowanej w kolejnych równych odstępach czasu τ_2 .

Tablica 4

Warunki obróbki cieplno-chemicznej próbek wykonanych ze stopu EJ-437B

Nazwa operacji	Temperatura załadowania [°C]	Czas dojścia do temperatury aluminiowania [godz.]	Czas aluminiowania [godz.]	Temperatura aluminiowania [°C]
Aluminiowanie	400	4,5	25	750
Aluminiowanie	400	5,0	25	800
Aluminiowanie	400	5,5	25	850
Aluminiowanie	400	6,0	25	900
Aluminiowanie	400	6,5	25	950

Wpływ temperatury na grubość warstwy aluminiowanej przeprowadzono na próbkach aluminiowanych w temperaturze 750°C, 800°C, 850°C, 900°C i 950°C w czasie 25 godz. (rys. 2). Warunki obróbki cieplno-chemicznej tych próbek zamieszczono w tablicy 4. Po procesie aluminiowania wszystkie próbki wyżarzono w temperaturze 750°C w czasie 2 godz. Stwierdzono bardzo intensywny wzrost grubości warstwy naaluminiowanej ze wzrostem temperatury.



Rys. 3. Struktura warstwy naaluminiowanej i temperatura aluminiowania 750°C, czas aluminiowania 25 godz. Pow. 300x (zdjęcie 56 z mikrofilmu)

Z danych literaturowych wynika, że celem zabezpieczenia przed utlenieniem stosuje się powłoki ochronne, których grubość wynosi minimum 6 μm [4]. W polskim przemyśle lotniczym w przypadku stosowania warstw naaluminiowanych ich grubość wynosi minimum 20 μm . Z uwagi na to, że za podstawowe parametry procesu aluminiowania przyjęto temperaturę 750°C i czas 25 godz, gwarantują one osiągnięcie grubości warstwy minimum 20 μm . Wprawdzie aluminiowanie w zakresie temperatur wyższych od 750°C jest dużo szybsze, nie może ono niestety być stosowane, ponieważ w zakresie tych temperatur następuje koagulacja fazy η , umacniającej stop EJ-437B i co się z tym wiąże - wyraźne obniżenie żarowytrzymałych własności [5, 6].

ne obniżenie żarowytrzymałych własności [5, 6].

Na rys. 3 pokazano strukturę warstwy naaluminowanej, otrzymaną po aluminowaniu w temperaturze 750°C w czasie 25 godz.

Celem sprawdzenia wpływu zastosowanego procesu aluminowania na własności fizykochemiczne stopu EJ-437B przeprowadzono badania żarowytrzymałości i żaroodporności.

Próby pełzania wykonano na próbkach aluminowanych w temperaturze 750°C w czasie 25 godz. oraz, dla porównania uzyskanych wyników i przebiegu krzywych pełzania, na próbkach niealuminowanych. Prób dokonano na pełzanie typu Chevenard w stałej temperaturze 700°C i przy stałym obciążeniu $\sigma = 46 \text{ kg/mm}^2$. Przebieg wydłużenia trwałego w funkcji czasu pełzania pokazano na rys. 4. Równocześnie z próbami na pełzanie, rejestrowanymi przy użyciu samopisu, przeprowadzono uproszczone badania wytrzymałości na pełzanie próbek aluminowanych i niealuminowanych zgodnie z obowiązującymi warunkami technicznymi badania stopu EJ-437B wg TU-14-1-223-72. Wyniki tych badań zamieszczono w tablicy 5.

Tablica 5

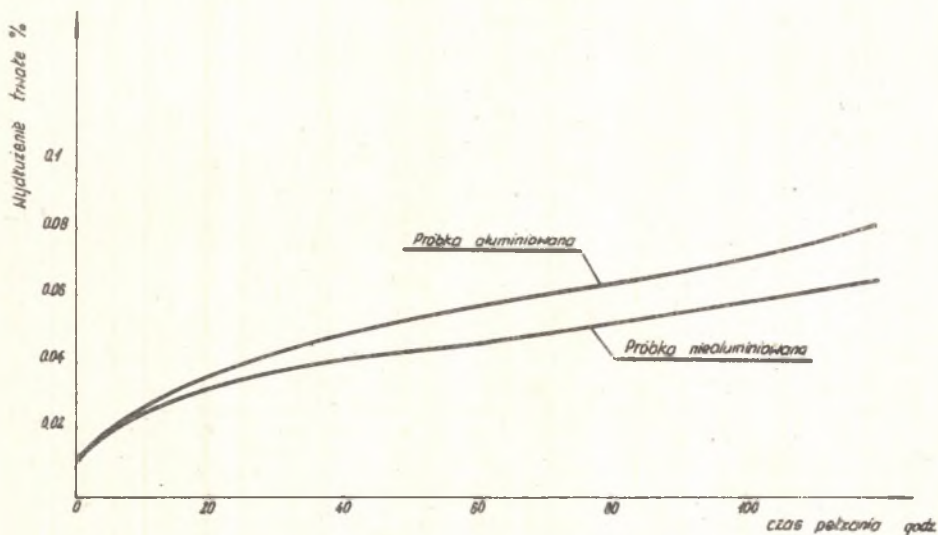
Wyniki uproszczonych badań wytrzymałości na pełzanie próbek aluminowanych i niealuminowanych ze stopu EJ-437B

Nr próbki	Rodzaj próbki	Czas, po którym próbka zerwała się [godz.]	Wydłużenie względne mierzone w temperaturze starzenia [%]
1	Aluminowana	245	6,3
2	Aluminowana	409	7,3
3	Aluminowana	332	5,6
4	Niealuminowana	376	7,6
5	Niealuminowana	298	6,1
6	Niealuminowana	451	8,9

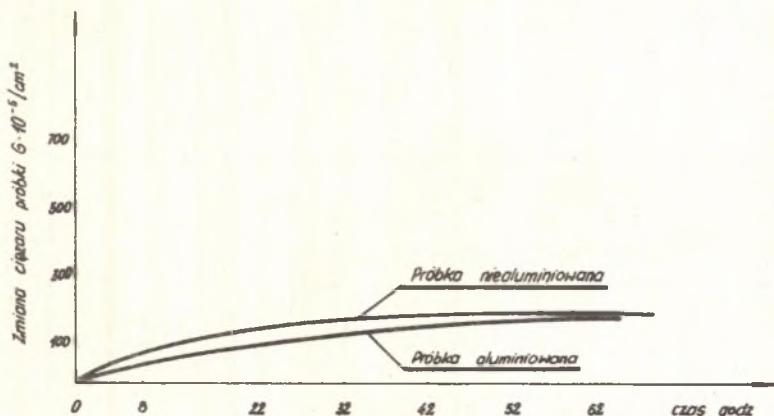
Z przeprowadzonych badań pełzania wynika, że czas po którym podczas prób pełzania nastąpiło zerwanie próbek aluminowanych wielokrotnie przekracza czas minimalny (40 godz.), wymagany przez warunki techniczne, stosowane w produkcyjnych badaniach kontrolnych, będących kryterium oceny przydatności materiału do produkcji i eksploatacji. Czas pełzania próbek aluminowanych jest tego samego rzędu, co czas pełzania próbek niealuminowanych. Analizując otrzymane wyniki badań i dodatkowo uwzględniając chemiczne działanie spalin z równoczesnym działaniem naprężeń oraz biorąc pod uwagę, że wielkość naprężeń rzeczywistych w łopacie podczas pracy jest kilkakrotnie mniejsza od występujących w badaniach ($\sigma = 46 \text{ kg/mm}^2$), można stwierdzić, że wytrzymałość czasowa łopatek aluminowanych jest nie mniejsza od łopatek niealuminowanych.

Badania żaroodporności warstwy aluminowanej przeprowadzono w temperaturze 700°C i 850°C. Żaroodporność próbek aluminowanych i niealuminowa-

nych określono metodą przyrostu ciężaru. Próbki wyżarzono w atmosferze powietrza w piecu PEK-0. Na rys. 5 i 6 pokazano przyrost ciężaru w funkcji czasu wyżarzania badanych próbek w temperaturach 700°C i 850°C .

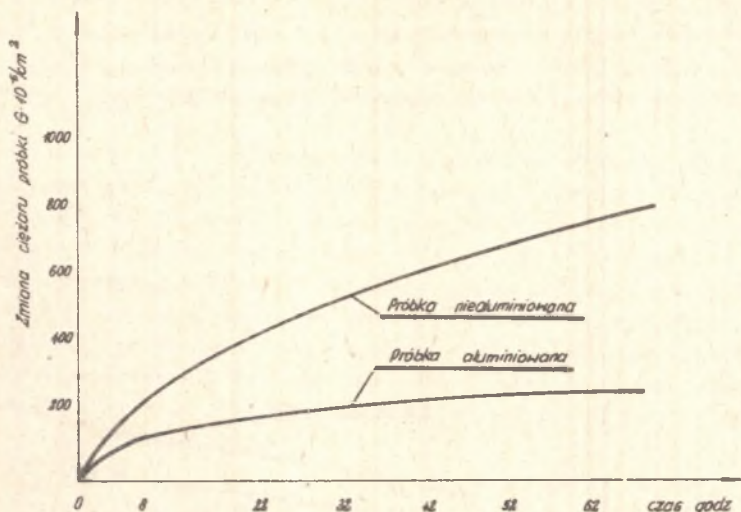


Rys. 4. Przebieg wydłużenia trwałego w funkcji czasu pełzania



Rys. 5. Zmiana ciężaru próbek aluminiowanych i niealuminiowanych w funkcji czasu wyżarzania (temperatura wyżarzania 700°C)

Przyrost ciężaru próbek niealuminiowanych w stosunku do aluminiowanych podczas ich wyżarzania w temperaturze 700°C jest niewielki. Z obserwacji mikroskopowych wynika, że na powierzchni próbek niealuminiowanych wystę-



Rys. 6. Zmiana ciężaru próbek aluminowanych i niealuminowanych w funkcji czasu wyżarzania (temperatura wyżarzania 850°C)

pują nieznaczne ślady utlenień. Natomiast podczas badań zaroodporności w temperaturze 850°C, mimo krótkiego okresu czasu badań (62 godz.) odporność na utlenienie próbek aluminowanych jest dwukrotnie większa niż niealuminowanych. W tym przypadku w strefie powierzchniowej próbek niealuminowanych stwierdza się wyraźne zmiany strukturalne. Natomiast w strefie powierzchniowej próbek aluminowanych występuje wyłącznie nieznaczne zwiększenie grubości warstwy naaluminowanej oraz niewielkie ślady utlenień.

WNIOSKI

1. Aluminowanie stopu EJ-437B w temperaturze 750°C, tj. temperaturze zbliżonej do temperatury starzenia w czasie 25 godz. prowadzi do utworzenia warstwy naaluminowanej o grubości 20 μm .

2. Warstwa naaluminowana nie powoduje obniżenia wytrzymałości na pełzanie stopu EJ-437B, natomiast powoduje bardzo intensywny wzrost jego zaroodporności.

LITERATURA

- [1] Goward C.W., Boone D.H., Giggins C.S.: Formation and Degradation Mechanisms of Aluminide Coatings on Nickel - Base Superalloys. Trans. Asme, 60, 1967, s. 228.

- [2] Sims C.T., Hagel W.C.: The Superalloys - Vital High Temperature Gas Turbine Materials for Aerospace and Industrial Power. J. Willey and Sons, New York - London - Sydney - Toronto, 1972.
- [3] Gierek A., Swadźba L., Formanek B., Kowalski A., Ruda M.: Dyfuzyjne powłoki aluminiowe wytwarzane kontaktową metodą gazową jako zabezpieczenie przed wysokotemperaturowym utlenieniem żarowytrzymałych stopów niklu, IV Konferencja Naukowo-Techniczna - Technologia Przepływowych Maszyn Wirnikowych, Rzeszów 1978.
- [4] Waśko L., Szurlej R.: Praca dyplomowa (napisana pod kierunkiem Z. Raczynskiego) pt.: Badania wpływu aluminiowania na własności stopu EJ-437B, Rzeszów 1975, Politechnika Rzeszowska, Biblioteka Instytutu Budowy Maszyn.
- [5] Raczynski Z., Brykczynski J.: Badania wpływu temperatury starzenia na własności wytrzymałościowe stopu EJ-437B, Tech.Lot. i Astronaut., nr 12, 1976, s. 12.
- [6] Raczynski Z.: Badania wpływu czasu wyżarzania na proces koagulacji cząstek fazy η' w stopie EJ-437B, Materiały V Konferencji Mikroskopii Elektronowej Ciała Stałego, Warszawa - Jadwisin 1978, s. 177.

АЛЮМИНИЗАЦИЯ ЖАРОУПОРНОГО СПЛАВА EJ-437B
НА НИКЕЛЕВОЙ ОСНОВЕ

Р е з ю м е

В работе представлены результаты исследований наращивания алюминиевого покрытия порошковым методом на сплав EJ-437B. Установлено, что алюминизация при температуре 750°C в течение 25 часов даёт слой толщиной в 20 мкм, характеризующийся значительно повышенной жароупорностью.

ALUMINIZING OF THE CREEP RESISTANT EJ-437B ON THE NICKEL MATRIX

S u m m a r y

The paper presents the results of research on accretion of an aluminum coating on the EJ-437B alloy. The powder method was used. It has been proved that aluminizing in the temperature of 750°C in the course of 25 hours leads to the growth of a layer 20 μm thick, with clearly better creep resistance.