

Marek Cieśla, Tadeusz Lamber, Lucjan Swadźba  
Wydział Metalurgii i Inżynierii Materiałowej  
Politechniki Śląskiej

MODELOWE BADANIA WPŁYWU ŻAROODPORNYCH WARSTW DYFUZYJNYCH NA TRWAŁOŚĆ  
STOPU NIKLU EI867 W WARUNKACH OBCIĄŻEŃ NISKOCYKLICZNYCH

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki badań wpływu niektórych czynników technologicznych wytwarzania żaroodpornych warstw dyfuzyjnych na trwałość próbek ze stopu niklu EI867 w warunkach obciążeń niskocyklicznych w temperaturze 800°C.

Резюме. В работе представлены результаты исследования влияния некоторых факторов технологии производства диффузионных жаростойких защитных покрытий на образцы из никелевого сплава EI867 в условиях малоциклового усталости в температуре 800°C.

Summary. Results of the influence some technological factors of manufacturing heat resisting diffusive coatings on specimen durability EI867 alloy under low-cycle fatigue conditions at temperature 800°C have been shown.

## 1. WPROWADZENIE

Zwiększenie trwałości elementów lotniczych silników turbinowych eksploatowanych w warunkach cyklicznie zmiennych pól siłowych i temperaturowych jest trudne do osiągnięcia stosowanymi dotąd konwencjonalnymi metodami a mianowicie poprzez wytwarzanie nowych gatunków stopów o wyższych własnościach w porównaniu ze stopami istniejącymi. W chwili obecnej bowiem wylania się druga grupa zagadnień związana z obniżeniem materiałochłonności elementów turbin gazowych wykonanych z drogich i deficytowych stopów niklu oraz obniżenie kosztów ich wytwarzania i eksploatacji. Obie grupy zagadnień można rozwiązać w sposób racjonalny, stosując pokrycia ochronne np. dyfuzyjnymi żaroodpornymi warstwami ochronnymi, których strukturę i własności można kształtować parametrami ich otrzymywania, w zależności od warunków eksploatacyjnych [1,2]. W pracy przykładem

takiego rozwiązania jest problem zwiększenia trwałości łopatek turbin spaliniowych wykonanych ze stopów żarowytrzymałych przez konstytuowanie w procesie technologicznym dyfuzyjnych warstw ochronnych odpornych na utlenianie oraz korozję w środowisku zawierającym związki siarki [2]. Tak więc pożądane wydają się być prace doświadczalne i analityczne nad metodami projektowania i technologiami wytwarzania warstw o wysokiej trwałości w warunkach oddziaływania podwyższonej temperatury i złożonego stanu naprężenia. Stąd badania procesu niszczenia łopatek turbin w warunkach eksploatacyjnych są problemem bardzo złożonym ze względu na duży zbiór różnorodnych i równocześnie zachodzących zjawisk, a tym samym trudnym do symulowania w warunkach laboratoryjnych [1,3]. W związku z tym rozwiązanie problemu postawionego w pracy wymaga przyjęcia do badań odpowiedniego modelu fizycznego. W pracy model ten stanowi próbka okrągła ze stopu Nimonic EI867 stosowanego na łopatki silników turbinowych z dyfuzyjną warstwą żaroodporną.

## 2. CEL I ZAKRES BADAŃ

Celem pracy jest ocena możliwości zwiększenia trwałości badanych elementów, poddanych niskocyklicznemu obciążeniu w temperaturze  $800^{\circ}\text{C}$  w wyniku wytworzenia na ich powierzchni warstw żaroodpornych na bazie aluminium. Przyjmując za ocenę trwałości ilość cykli do zniszczenia próbki, można będzie na podstawie wyników badań zbudować modele matematyczne wiążące trwałość z fizyko-mechanicznymi własnościami i geometrią warstw wierzchnich.

Z uwagi na obszerny zakres i rodzaj zjawisk towarzyszących cyklicznym odkształceniom w wysokich temperaturach, w niniejszej pracy będącej pierwszym etapem kompleksowych badań, ograniczono się jedynie do trzech zakresów grubości warstw wierzchnich typu Cr-Al i Si-Al sterowanych parametrami obróbki cieplno-chemicznej. Układem odniesienia dla wyników badań próbek z warstwą wierzchnią były wyniki badań próbek ze stopu EI867.

## 3. MATERIAŁY I PRÓBKİ DO BADAŃ

Materiał do badań stanowił żarowytrzymały stop niklu EI867, stosowany do wytwarzania łopatek turbin gazowych. Wykonano próbki czterokrotne o

Tablica 1

Wyniki pomiarów grubości i mikrotwardości warstw dyfuzyjnych

Rodzaj warstwy	Obróbka ciepło-chemiczna	Obróbka cieplna	Grubość warstwy [ $\mu\text{m}$ ]	Mikrotwardość $\mu\text{HV}$ [ $\text{kG}/\text{mm}^2$ ]		
				warstwa zewnętrzna	warstwa przej.	podłoże
I	-	950°C/10h	-	-	-	480
II	Cr-Al 950°C/6h	950°C/4h	50-70	730-500	870-750	460
III	Si-Al 800°C/4h	950°C/10h	70-80	1130-520	900-640	480
VI	Cr-Al 1050°C/6h	-	130-150	1060-720	1050-680	470

średnicy 10mm. Warstwy dyfuzyjne wytwarzano metodą kontaktowo-gazowego krzemoaluminowania oraz chromoaluminowania [2]. Parametry procesu nanoszenia warstw (tabl.1) dobrano tak, aby suma czasów obróbki ciepło-chemicznej i obróbki cieplnej dla każdego typu powłoki wynosiła 10h, co decydowało o jednakowej strukturze i własnościach mechanicznych rdzenia próbek ze stopu EI867. Po procesie dyfuzyjnego nasycania próbek wykonywano pomiary grubości i mikrotwardości warstw (tabl.1).

#### 4. BADANIA NISKOCYKLICZNE

Badania realizowano na stanowisku serwohydraulicznym MTS-810 w warunkach zmęczenia niskocyklicznego w temperaturze 800°C przy sterowaniu maszyny odkształceniem całkowitym, uzyskując przebiegi zależności pomiędzy naprężeniami i odkształceniami w postaci pętli histerezy  $\sigma=f(\epsilon)$ . Symulowano w ten sposób na próbce proces cyklicznego odkształcania najbardziej wyęźżonej objętości materiału łopatk. Próbkę nagrzewano metodą indukcyjną a temperaturę kontrolowano przy użyciu termopar Pt-Rh/Pt.

#### 5. WYNIKI BADAŃ

W wyniku przeprowadzonych badań uzyskano pętle histerezy przedstawiające zmiany siły  $F$  w funkcji odkształcenia  $\Delta\epsilon$  przyjętego za kryterium trwałości. Odczyty parametrów pętli histerezy ( $\Delta\epsilon_{pi}$ ,  $\Delta\epsilon_{spr}$ ), odzwierciedlające własności próbek z warstwami wierzchnimi na bazie Cr-Al i Si-Al,

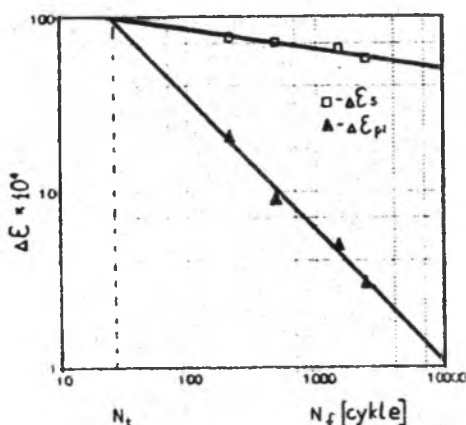
Tablica 2

Modele matematyczne i wartości współczynników regresji i korelacji funkcji  $\Delta\epsilon_{sp}=f(N_f)$ ,  $\Delta\epsilon_{pl}=f(N_f)$  i  $\Delta\epsilon_c=f(N_f)$

Rodzaj warstwy	$\Delta\epsilon_{sp} = \frac{\sigma'_f}{E} \cdot N_f^b$	$\Delta\epsilon_{pl} = \epsilon'_f \cdot N_f^c$	$\Delta\epsilon_c = A \cdot N_f^k$
I	$\frac{\sigma'_f}{E} = 0.012$ $b = -0.104$ $r = 0.98$	$\epsilon'_f = 0.0665$ $c = -0.76$ $r = 0.99$	$A = 0.022$ $k = -0.183$ $r = 0.99$
II	$\frac{\sigma'_f}{E} = 0.0144$ $b = -0.117$ $r = 0.97$	$\epsilon'_f = 0.112$ $c = -0.84$ $r = 0.99$	$A = 0.024$ $k = -0.185$ $r = 0.99$
III	$\frac{\sigma'_f}{E} = 0.014$ $b = -0.11$ $r = 0.96$	$\epsilon'_f = 0.117$ $c = -0.76$ $r = 0.99$	$A = 0.028$ $k = -0.196$ $r = 0.98$
IV	$\frac{\sigma'_f}{E} = 0.011$ $b = -0.093$ $r = 0.98$	$\epsilon'_f = 0.0072$ $c = -0.48$ $r = 0.95$	$A = 0.015$ $k = -0.133$ $r = 0.99$

stanowiły punkt wyjścia do wyznaczenia współczynników w kryterium Morrowa (tab.2):

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = \frac{\Delta\epsilon_{sp}}{2} + \frac{\Delta\epsilon_{cp}}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \epsilon'_f (2N_f)^c \quad \dots \quad 1$$

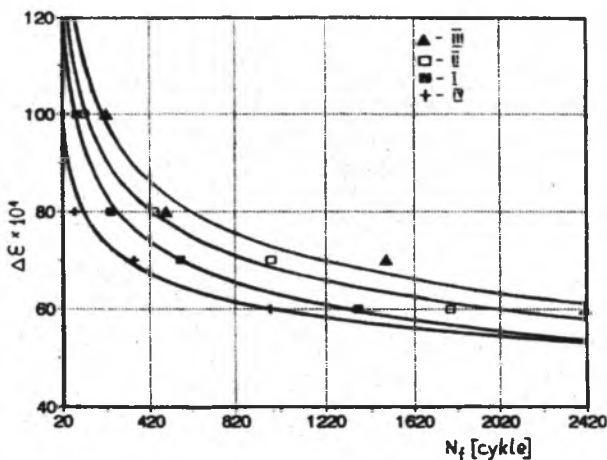


Rys.1 Wykresy zmęczeniowe dla próbek z krzemooalumińową warstwą wierzchnią. Aproksymacja wzorami wg tab.2

Fig.1 Fatigue diagrams for silico-aluminium coating specimen. Approximation by formulas in table 2

Graficzną postać równania (1) w układzie logarytmicznym dla wybranych próbek przedstawia rysunek 1. Współrzędna punktu przecięcia prostych  $\Delta\epsilon_p$  i  $\Delta\epsilon_s$  oznaczona jako  $N_r$  przyjmuje dla badanych próbek wartości od kilku do kilkudziesięciu cykli. Świadczy to o tym, że dla badanych materiałów odporność na odkształcenia cykliczne zależy głównie od własności wytrzymałościowych.

Korzystając z metod analizy regresji i korelacji opracowano również dla badanych próbek modele matematyczne funkcji  $N_z=f(\Delta\epsilon_c)$  (tab.2), których graficzną postać przedstawiono na wykresie zbiorczym (rys.2).

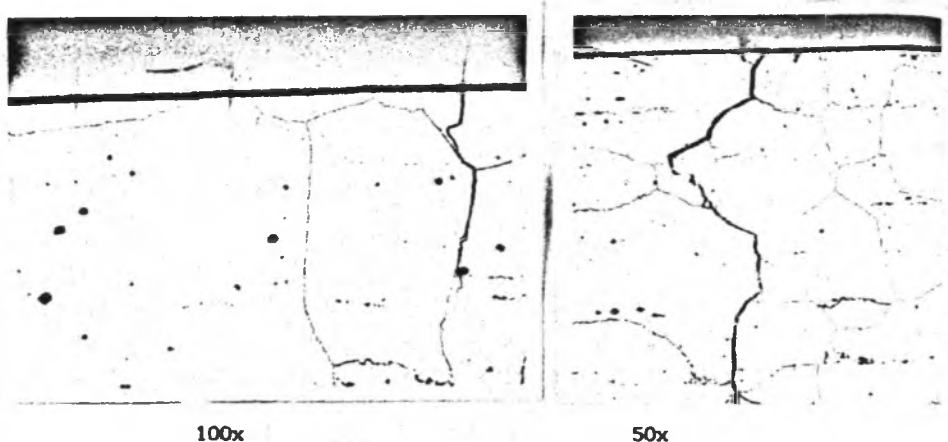


Rys.2 Wykresy zmęczeniowe w układzie logarytmicznym dla osi  $\Delta\epsilon_c$ ,  $N_z$  - aproksymacja wzorami wg tab.2

Fig.2 Fatigue diagrams in the axis arrangement  $\Delta\epsilon_c$ ,  $N_z$  - approximation by formulas in table 2

Z przebiegu krzywych zmęczeniowych można ocenić, które z badanych próbek cechowały się największą a które najmniejszą trwałością w danych warunkach badań.

W celu przeprowadzenia analizy charakteru inicjacji i propagacji mikro-pęknięć w procesie zmęczenia niskocyklicznego, dokonywano obserwacji mikroskopowych na odpowiednio przygotowanych zgiądach metalograficznych (rys.3).



Rys.3 Mikrostruktura strefy przypowierzchniowej z pęknięciami po badaniach zmęczeniowych próbki z krzemaluminową warstwą dyfuzyjną

Fig.3 The surface microstructure with cracks in specimen with silico-aluminium diffusive coating after fatigue test

## 6. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań i analizy uzyskanych wyników sformułowano następujące wnioski:

1. Trwałość próbek z warstwami, począwszy od próbek o trwałości największej do najmniejszej przedstawia się następująco:

- próbki krzemaluminowane w temp.  $800^{\circ}\text{C}$  w czasie 4h, z następnym wygrzewaniem w temp.  $950^{\circ}\text{C}$  w czasie 10h;
- próbki chromoaluminowane w temp.  $950^{\circ}\text{C}$  w czasie 6h, z następnym wygrzewaniem w temp.  $950^{\circ}\text{C}$  w czasie 4h;
- próbki bez dyfuzyjnej warstwy wierzchniej poddane wygrzewaniu w temp.  $950^{\circ}\text{C}$  w czasie 10h;
- próbki chromoaluminowane w temp.  $1050^{\circ}\text{C}$  w czasie 10h.

2. Istnieje ścisły związek pomiędzy trwałością próbek z dyfuzyjnymi warstwami typu Al-Cr a grubością tych warstw, przy czym trwałość próbek z warstwami o grubości  $50\text{-}80\mu\text{m}$  jest kilkakrotnie większa od trwałości próbek z warstwami o grubości  $130\text{-}150\mu\text{m}$ .

3. Zaproponowany sposób badań może stanowić jeden z podstawowych elementów w metodyce oceny trwałości stopów niklu z żaroodpornymi warstwami dyfuzyjnymi przeznaczonymi na elementy turbin gazowych.

4. Czas wygrzewania w procesie dyfuzyjnego nanoszenia warstwy wierzchniej typu Cr-Al i Si-Al decyduje o ich grubości, co z kolei ma bezpośredni związek z trwałością zmęczeniową próbek.
5. Pęknięcia zainicjowane w warstwie dyfuzyjnej - prostopadłe do podłoża - przechodzą w pęknięcia po granicach ziaren w materiale podstawowym.
6. Wpływ dyfuzyjnych warstw typu Cr-Al i Si-Al na trwałość próbek ze stopów niklu stanowić może podstawę do opracowania wytycznych w procesie technologicznym kształtowania struktury tych materiałów.

## LITERATURA

- [1] Swadźba L., Maciejny A., Formanek B., Białożył K.: Zagadnienia otrzymywania żaroodpornych warstw ochronnych na żarowytrzymałych stopach niklu. Inżynieria Materiałowa, nr2, 1989, s.57-64; wyd. SIGMA Warszawa.
- [2] Swadźba L., Formanek B., Ruda M., Supernak W.: Technologia wytwarzania i własności żaroodpornych warstw dyfuzyjnych na żarowytrzymałych stopach niklu. Inżynieria Materiałowa, nr4-5, 1984, s.140-147; wyd. SIGMA Warszawa.
- [3] Lamber T., Okrajni J.: Metodyka oceny zmęczenia cieplnego konstrukcji na podstawie izotermicznych badań materiału w zakresie małej liczby obciążeń cyklicznych. Zeszyty Naukowe Pol. Śląskiej, seria Hutnictwo z.26, Gliwice 1985.

MODEL RESEARCHES OF THE INFLUENCE HOT CORROSION RESISTANT  
DIFFUSION COATINGS ON Ni-BASE EI867 SUPERALLOY  
UNDER CONDITION OF THE LOW CYCLE FATIGUE

Results of the influence some technological factors of manufacturing heat resisting diffusive coatings on specimen durability EI867 alloy under low-cycle fatigue conditions at temperature 800°C have been shown.

The results of investigations have been presented as diagrams and mathematical models. Better durability of specimens with silico-aluminium diffusion coatings in comparison with chrom-aluminium diffusion coatings under accepted conditions of low-cyclic fatigue has been pointed out. The usefulness of low-cyclic fatigue as a research method of testing heat resisting coatings has been exhibited.