

Kompozyty 10: 3 (2010) 195-199



Tomasz Durejko*, Stanisław Lipiński

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Nowych Technologii i Chemii, Katedra Zaawansowanych Materiałów i Technologii ul. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, Poland * Corresponding author. E-mail: tdurejko@wat.edu.pl

Otrzymano (Received) 01.02.2010

ANALIZA ODPORNOŚCI NA ZUŻYCIE MATERIAŁÓW GRADIENTOWYCH TYPU Fe-AI

Przedstawiono wyniki badań odporności na zużycie ścierne spiekanych materiałów gradientowych na osnowie faz intermetalicznych z układu Fe-Al. Materiał badawczy wytworzono w dwóch wariantach: z płynną i skokową zmianą zawartości aluminium. Pomiary odporności na zużycie ścierne przeprowadzono metodą "pin on disc" dla skojarzeń materiał gradientowy od strony Fe50Al-stal 0H18N9 i gradient od strony Fe-stal 0H18N9. Podczas prób zużyciowych rejestrowano zmiany współczynnika tarcia w funkcji czasu trwania próby. Przeprowadzono analizę współpracujących powierzchni próbki i przeciwpróbki, rejestrując profil chropowatości oraz mikroskopowe obrazy topograficzne. Analizę oceny jakościowej badanych powierzchni przeprowadzono w oparciu o parametry profilu chropowatości R_a i R_z .

Stwierdzono, że współczynnik tarcia w przypadku pary ciernej Fe-przeciwpróbka i Fe50Al-przeciwpróbka ma porównywalną wartość wynoszącą około 0,5. Analiza powierzchni próbek (strony Fe50Al i Fe) po zużyciu w warunkach tarcia suchego wskazuje na dominujący charakter zużycia adhezyjnego. Na powierzchni Fe50Al widoczne są liczne zaciągnięcia materiału próbki, zaobserwowano również przenoszenie materiału z przeciwpróbki na próbkę i odwrotnie. Mechanizm zużycia przeciwpróbki (stal 0H18N9) był nieco inny, powierzchnia nosi ślady mikroskrawania i mikrobruzdowania, których główną przyczyną mogły być wykruszone z próbki cząstki tlenków.

Słowa kluczowe: fazy międzymetaliczne Fe-Al, materiały gradientowe Fe-Al, metoda "pin on disc"

ANALYSIS OF WEAR RESISTANCE OF Fe-AI GRADED MATERIALS

The analysis of wear resistance of Fe-Al graded materials was presented in this paper. The materials were produced by the laminar batch preparation of the matrix, by the use of the numerically controlled batch head. Cold compressed compacts were sintered under the periodically changing load, and then were annealing at the temperature of 1200°C in the inert gas atmosphere. Two technological variants of Fe-Al graded materials were manufactured: continuous and discrete (three samples for every variant). Wear abrasion test was performed in air temperature on a pin-on-disc T10 apparatus. The samples were prepared by electric discharge machining. The dimensions of the Fe-Al gradient pin were 3.5 mm in diameter by 4.2 mm in height. The pin was pushed against counter face (0H18N9 alloy, average hardness 30 HRC) with a pressure of 1.6 MPa at sliding velocity of 0.2 m/s during 2 hours. Every gradient samples wearing off from two sides: "pure iron" and Fe50Al phase.

The results of wear test was presented as loss linear dimension and change of friction coefficient versus time of sliding. Additionally, the surfaces of the each frictional couple (pin and face counter) were examined by profilometer (analysis of roughness profiles - R_a and R_z parameters) and observed by SEM using BSE method.

It was found the friction coefficient was comparable for all investigated friction couples, and its value was about 0.5. Additionally, wear level of continuous and discrete Fe-Al gradient was the same both pure iron side and Fe50Al side. Therefore further investigation carried out only one technological variant. It was stated the loss linear dimension for Fe-0H18N9 couple is about 600 μ m versus of 30 μ m wear of Fe50Al-0H18N9. Analysis of the surfaces of "pure Fe" and Fe50Al side and after dry-friction wearing, indicates that dominant mechanism of wearing is adhesive. The wearing of counter sample (0H18N9 steel) is quite different. Analysis of wear traces micrographs for indicates wear of counter face is a combination of adhesive wear, abrasion and erosion. The mechanism of wearing is near abrasive for counter face mated with Fe50Al side of Fe-Al gradient.

Keywords: powder metallurgy, Fe-Al intermetallic phases, Fe-Al graded materials, "pin on disc" method

WSTĘP

Materiały na osnowie faz międzymetalicznych posiadają szereg unikatowych właściwości wynikających głównie z mieszanego charakteru wiązań międzyatomowych, będących wypadkową wiązania jonowego, kowalencyjnego i metalicznego. Główne zalety tych materiałów to m.in.: wysoka wytrzymałość w podwyższonej temperaturze, odporność na korozję w środowiskach zawierających tlen, siarkę i węgiel oraz dobra odporność na zużycie ścierne [1].

Aby sprostać coraz to bardziej wysublimowanym wymaganiom nowoczesnych konstrukcji, konieczne jest stosowanie zaawansowanych materiałów, które sprostaT. Durejko, S. Lipiński

ją "ostrym" warunkom eksploatacji. Są to między innymi materiały gradientowe. Ich projektowanie jest ściśle związane z planowaną aplikacją. Dzięki temu możliwe jest nie tylko zwiększenie funkcjonalności urządzeń, ale również uproszczenie ich konstrukcji. Możliwość łączenia w jednej "objętości" materiałów o krańcowo różnych właściwościach fizykomechanicznych bez występowania karbu strukturalnego stanowi ważne osiągnięcie w dziedzinie inżynierii materiałowej. Płynna zmiana składu chemicznego lub innych czynników prowadzi do zmiany właściwości w określonym kierunku. Cecha ta powoduje, że materiały gradientowe są zdolne do redukcji koncentracji naprężeń cieplnych i mechanicznych w wielu elementach przeznaczonych do zastosowań specjalnych [2, 3].

Z układu równowagi Fe-Al jedynie fazy międzymetaliczne FeAl i Fe₃Al mogą stanowić osnowę tworzyw konstrukcyjnych. Przypuszcza się jednak, że jest możliwe wykorzystanie innych faz obecnie uważanych za szkodliwe, takich jak: Fe₂Al₅ czy FeAl₂, np. jako stref o podwyższonej odporności na zużycie i korozję [4, 5].

Celowe wydaje się więc podjęcie badań w celu połączenia wysokich właściwości wytrzymałościowych i użytkowych spiekanych materiałów na osnowie faz z układu Fe-Al i szerokich możliwości materiałów gradientowych. W pracy przedstawiono pierwsze wyniki, które w połączeniu z nadal prowadzonymi badaniami mają na celu stworzenie dwuwymiarowej mapy właściwości materiałów gradientowych. Zestawienie zmian właściwości w zależności od składu i struktury materiałów gradientowych pozwoli w pełni kontrolować jego właściwości na etapie wytwarzania, a zatem uzyskać materiał dostosowany do warunków pracy.

MATERIAŁ I METODYKA BADAŃ

Wykorzystując autorską metodę wytwarzania spieków gradientowych Fe-Al, bazujących na mieszaninie czystych technicznie proszków żelaza i aluminium, wykonano serię próbek do badań odporności na zużycie ścierne. W zależności od przyjętego wariantu materiałowego skład chemiczny mieszaniny proszkowej zmieniano w sposób ciągły (rys. 1a) lub dyskretny (z założonym krokiem co do składu chemicznego) (rys. 1b) poprzez odpowiedni dobór parametrów technologicznych procesu zasypywania [6, 7].



Rys. 1. Modele układów gradientowych Fe-Al: a) ciągły, b) dyskretny Fig. 1. The models of graded Fe-Al systems: a) continuous, b) discrete

Próbki w postaci walca o wymiarach Ø3,5/4,2 mm (po trzy dla każdego wariantu materiałowego) poddano testom odporności na zużycie metodą "pin on disc", w warunkach tarcia suchego, na testerze T10. Podczas próby stosowano stałą wartość nacisków jednostkowych równą 1,6 MPa przy prędkości obwodowej v = 0,2 m/s. Przeciwpróbkę wykonano ze stali 0H18N9 o średniej twardości 30 HRC. Całkowity czas próby wynosił 2 godziny (odliczając początkowy 10-minutowy okres ustalania się warunków współpracy w węźle ciernym). Temperatura współpracującej pary była kontrolowana i utrzymywana na poziomie 25±2°C. Zużycie liniowe i zmianę współczynnika tarcia przedstawiono w funkcji czasu trwania próby zużyciowej.

Po testach zużyciowych dla każdej z badanych par próbka-przeciwpróbka przeprowadzono analizę stanu warstwy wierzchniej współpracujących ze sobą powierzchni. Do tego celu wykorzystano profilometr PGM-1C wyposażony w głowicę G250BS o zakresie pomiarowym 1÷250 µm. Na podstawie zarejestrowanego profilu chropowatości wyznaczono parametry R_a i R_z . Ślady zużycia na powierzchni badanych próbek obserwowano za pomocą mikroskopu elektronowego, wykorzystując technikę BSE. Aby zapewnić odpowiednią współpracę par ciernych i podobne warunki we wszystkich próbach, badane powierzchnie próbek i przeciwpróbek przygotowano w odpowiedni sposób (tab. 1).

TABELA 1. Zestawienie parametrów chropowatości powierzchni spieków Fe-Al od strony Fe i Fe50Al przed i po próbie odporności na zużycie ścierne

TABLE 1. The roughness parameters for "pure Fe" and Fe50Al side of Fe-Al gradient before and after the wear test

Strona		Fe50Al		Fe	
gradient	u	Przed próbą	Po próbie	Przed próbą	Po próbie
Przeciwpróbka (0H18N9)	$R_a, \mu m$	0,18	0,722	0,18	2,738
	$R_z, \mu m$	0,109	4,225	0,109	12,179
Próbka	$R_a, \mu m$	0,146	0,728	0,327	3,273
	R_z , µm	0,951	3,619	2,05	14,125

Aby powierzchnia próbki całkowicie przylegała do przeciwpróbki, przed testem szlifowano ją na papierze ściernym o gradacji 1000 naklejonym na przeciwpróbkę. Zarówno dla gradientu ciągłego, jak i dyskretnego określono odporność na zużycie od strony Fe i Fe50Al.

ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Ponieważ powierzchnie zewnętrzne spieków w obu wariantach materiałowych miały podobny skład chemiczny oraz mikrotwardość, wyniki przeprowadzonych badań nie wykazały istotnych różnic. Odnotowano natomiast całkowicie odmienny stopień i charakter zużycia dla par ciernych "Fe-przeciwpróbka" i "Fe50Al-przeciwpróbka" (rys. 2).



Rys. 2. Przebieg zmian współczynnika tarcia i wymiaru liniowego pary ciernej: a) Fe/0H18N9, b) Fe50Al/0H18N9 w funkcji czasu trwania próby

Fig. 2. Changes of the friction coefficient and loss linear dimension of: a) Fe/0H18N9, b) Fe50Al/0H18N9 couples versus time of sliding

Analizując otrzymane wyniki, stwierdzono, że współczynnik tarcia w przypadku pary ciernej Feprzeciwpróbka i Fe50Al-przeciwpróbka ma porównywalną wartość wynoszącą około 0,5. W każdym z przypadków na wykresie $\mu = f(t)$ można zauważyć efekt docierania, który trwa około 10 minut. Po upływie tego czasu wartość współczynnika tarcia stabilizuje się. W zależności od skojarzenia oscylacje jego wokół wartości średniej przybierają różny charakter (rys. 2). Wyższą częstotliwość i amplitudę wahnięć odnotowano dla pary ciernej Fe-przeciwpróbka (rys. 2a). Świadczy to o nieustabilizowanej pracy w węźle ciernym związanym z intensywnym zużyciem adhezyjnym.

Charakterystyka zmiany wymiaru liniowego próbki w funkcji czasu trwania próby nieznacznie odbiega od funkcji liniowej, przy zużyciu całkowitym równym około 600 μ m, co odpowiada grubości warstwy "czystego żelaza" w układzie badanego gradientu. Zmiana wymiaru liniowego od strony fazy międzymetalicznej jest o ponad rząd wielkości mniejsza i kształtuje się na poziomie 30 μ m (rys. 2b).

Współpracę analizowanych par ciernych można również ocenić, bazując na pomiarach struktury geometrycznej powierzchni (rys. rys. 3 i 4). Aby można było przeprowadzić analizę porównawczą powierzchni par ciernych po próbie zużycia, każdą z nich szlifowano wstępnie w takich samych warunkach (tab. 1).



Rys. 3. Struktura geometryczna: a) powierzchnia Fe, b) "dno śladu wytarcia" przeciwpróbki (0H18N9) po próbie zużycia

Fig. 3. Surface texture of: a) Fe side, b) "wearing out of bottom ridge" of counter face after wear test



Rys. 4. Struktura geometryczna: a) powierzchnia Fe50Al, b) "dno śladu wytarcia" przeciwpróbki (0H18N9) po próbie zużycia



W przypadku skojarzenia Fe-przeciwpróbka po próbie zużyciowej odnotowano około 10-krotny wzrost parametru R_a dla próbki i 100-krotny dla przeciwpróbki (tab. 1). Na obserwowanym dla powierzchni "czystego" żelaza profilu chropowatości stwierdzono kilkakrotny wzrost amplitudy wzniesień nierówności. "Wytarcie" przeciwpróbki wynosi w tym przypadku około 140 μ m. Dno "wytarcia" charakteryzuje się "ostrymi" zagłębieniami typowymi dla procesu bruzdowania i skrawania.

Zdecydowanie bardziej ustabilizowaną i poprawną współpracę próbka-przeciwpróbka można zaobserwować dla pary ciernej Fe50Al-stal 0H18N9. Pomimo widocznych śladów zużycia adhezyjnego (rys. 6) wartość parametru R_a dla próbki wzrasta tylko 5-krotnie. Interesujące efekty zaobserwowano na powierzchni przeciwpróbki. Ślad "wytarcia" wynosi zaledwie 10 µm, a jego dno posiada profil powierzchni charakterystyczny dla zużycia ściernego (rys. 4).

Analiza powierzchni próbek (strony Fe50Al i Fe) po zużyciu w warunkach tarcia suchego wskazuje na dominujący charakter zużycia adhezyjnego (rys. rys. 5a i 6a). Na powierzchni Fe50Al widoczne są liczne zaciągnięcia materiału próbki, zaobserwowano również przenoszenie materiału z przeciwpróbki na próbkę i odwrotnie. Mechanizm zużycia przeciwpróbki (rys. 5b) był nieco inny, powierzchnia nosi ślady mikroskrawania i mikrobruzdowania, których główną przyczyną mogły być wykruszone z próbki cząstki tlenków. Na śladzie zużycia widoczne są cząstki Al₂O₃ wbite w powierzchnię, które podczas współpracy ze względu na wysoką twardość działały jak ścierniwo.



Rys. 5. Topografia powierzchni: a) Fe50Al, b) przeciwpróbki po próbie zużyciowej

Fig. 5. Surface topography of: a) Fe50Al, b) counter face after Fe-Al gradient wear test





- Rys. 6. Topografia powierzchni: a) Fe, b) przeciwpróbki po próbie zużyciowej
- Fig. 6. Surface topography of: a) Fe, b) counter face after Fe-Al gradient wear test

Oceniając stan powierzchni współpracy od strony Fe, zauważono, że pomimo dwudziestokrotnie większego zużycia liniowego charakter zmian był podobny. Dominowało zużycie adhezyjne z wyraźnymi śladami mikroskrawania i mikrobruzdowania. Wyniki odporności na zużycie analizowanych układów ciernych zestawiono w tabeli 2.

TABELA 2. Wyniki odporności na zużycie badanych układów gradientowych Fe-Al

TABLE 2. The results of Fe-Al graded materials wear test

Parametr	Fe50Al	Fe	
współczynnik tarcia, µ	0,50±0,08	0,50±0,15	
zużycie liniowe Δl , µm	29	600	
intensywność zużycia tgα	0,053	0,268	

WNIOSKI

Analiza powierzchni próbki i przeciwpróbki po teście "pin on disc" wykazuje, iż zarówno dla pary ciernej Fe-stal 0H18N9, jak i Fe50Al-stal 0H18N9 występuje zużycie adhezyjne. Stwierdzono również, że w przypadku par ciernych Fe50Al-stal wykruszone cząstki Al₂O₃ wpływają na przyspieszone zużycie na drodze mikroskrawania. Badania potwierdzają, że, stosując technologie bazujące na przyrostowym komponowaniu wsadu matrycy i dwuetapowym procesie spiekania, można wytwarzać materiały lite, które zawierają w swojej objętości obszary o wysokiej twardości - odporne na zużycie, a także miękkie - podatne na odkształcenia, zaś wielkość i usytuowanie stref charakterystycznych mogą być dostosowane do przewidywanych warunków pracy.

W dalszej kolejności planuje się kompleksowe badania w celu stworzenia map rozkładu właściwości dla materiałów z ciągłym i dyskretnym efektem gradientowym, które będą przydatne podczas modelowania struktury materiałów gradientowych. Wyznaczone zależności pozwolą precyzyjnie określić skład i położenie obszarów charakterystycznych w taki sposób, aby właściwości wytwarzanych materiałów gradientowych były ściśle skorelowane ze specyfiką ich eksploatacji.

Podziękowania

Przeprowadzone badania zrealizowano w ramach projektu MNiSW Nr: 0N508 004434 (12-315/2008/ WAT).

LITERATURA

- [1] Bojar Z., Przetakiewicz W., Materiały metalowe z udziałem faz międzymetalicznych, Warszawa 2006, 89-91.
- [2] Sobczak J., Drenchev L., Functionally Graded Materials -Processing and Modeling, Warsaw 2008.
- [3] Major B., Projektowanie i wytwarzanie funkcjonalnych materiałów gradientowych, Kraków 2007.
- [4] Kukla P., Siniarski D., Opracowanie podstaw teoretycznych i wytwarzania FGM techniką hybrydową, Politechnika Łódzka, Instytut Inżynierii Materiałowej, Łódź 2007.
- [5] Kula P., Pietrasik R., Dybowski K., Vacum carburizing process optimization, Journal of Material Processing Technology 2005, 876-881.
- [6] Lipiński S., Durejko T., Komponowanie układów gradientowych Fe-Al na etapie formowania wsadu wejściowego, Materiały Konferencyjne XXXVII MSKN, Olsztyn 2008, s. 351-353.
- [7] Durejko T., Lipiński S., Wytwarzanie kompozytowych materiałów gradientowych na osnowie faz z układu Fe-Al, Kompozyty (Composites) 2009, 9, 3, 297-301.